

Centre de recherches routières

CRR

Code de bonne pratique

pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Recommandations

R 81 / 10

Ce document est une version revue du Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment (R74/04). Une révision de ce code de bonne pratique de 2004 était nécessaire, pour y introduire les liants hydrauliques routiers et tenir compte des nouvelles normes européennes. De plus, différents aspects relatifs aux études de laboratoires ont été revus. Cette révision a été réalisée par le groupe de travail APPD.4 Recyclage des terres du Centre de recherches routières (CRR).

Composition du groupe de travail

Secrétaire: C. Grégoire (CRR)

Membres:
H. Backaert (AWS)
E. Barbé (Copro)
D. Cloet (Cloet Gebroeders)
D. Coveliers (Heijmans Infra nv)
J. De Baets (Servaco)
R. De Bel (CRR)
M. Delaby (FWEV)
J. della Faille (Sotragex sa)
J. De Nutte (Copro)
E. Desmedt (VlaWeBo)
B. Dethy (CRR)
J. D'Hooghe (VlaWeBo)
I. Glorieux (Georoc Benelux)
S. Godefroid (Carmeuse sa)
D. Henderickx (Aclagro)
F. Henin (Holcim)
G. Herrier (Lhoist)
B. Janssens (CRR)
P. Keppens (MOW)
J. Petit (Carmeuse sa)
C. Ployaert (FEBELCEM)
M. Regnier (Tradecowall sc)
E. Schmit (Seco)
D. Stove (Grontmij)
F. Theys (CRR)
H. Van De Craen (VBG)
E. Vandenbraembussche (Copro)
J.-C. Verbrugge (ULB)
L. Verdonckt (Servaco nv)
P. Visse (Eloy)
P. Welter (SPW)
G. Welvaert (GMA)

Centre de recherches routières

Bruxelles

Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

R 81/10

Edité par le Centre de recherches routières
Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles

Table des matières

Avant-propos

La technique du traitement des sols est connue de longue date (Muraille de Chine, chaussées romaines, etc.). En Belgique, le traitement des sols a été utilisé à grande échelle dans les années 1960, au moment des grands programmes autoroutiers.

Actuellement, cette technique connaît un important regain d'intérêt en raison du renforcement des légalisations environnementales et de la pression croissante sur les matières premières. Cette technique offre une solution technique, économique et écologique à la problématique des terres de déblais, tant pour les petits que pour les grands chantiers.

Ce code de bonne pratique a pour objectif de guider les décideurs et techniciens voulant valoriser des sols par un traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques dans les différentes étapes du traitement des sols en leur donnant une synthèse des connaissances actuelles, tant sur le plan pratique que théorique.

Ce document n'a pas pour but de se substituer aux cahiers des charges et autres documents réglementaires.



Le présent guide n'a pas la vocation de se prononcer quant à la qualité environnementale du sol à recycler et part du postulat que les terres que l'on veut stabiliser répondent aux exigences des législations environnementales en vigueur pour l'application considérée.

Afin de faciliter la lecture, le document est subdivisé en 3 grands chapitres:

- **Connaissance des sols**: ce chapitre fait le point sur le comportement des différents types de sols et sur les caractéristiques permettant de les différencier. Il donne également un aperçu des essais de laboratoire à réaliser pour évaluer la pertinence d'un traitement et les dosages à appliquer.
- **Traitement**: ce chapitre donne une description des différents agents de traitement et de leurs effets sur le sol (processus entrant en jeu dans les traitements d'amélioration et de stabilisation des sols).
- **Modalités d'exécution**: ce chapitre donne une description de la conduite du chantier ainsi qu'un aperçu du matériel disponible pour traiter les sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques routiers.

Ce document est un complément indispensable aux fascicules pratiques rédigés pour les différentes applications du traitement des sols: amélioration pour remblayage de tranchées, stabilisation pour sous-fondations, amélioration de fonds de coffre et traitement du sol pour fondations de plates-formes industrielles.

Dans le cadre des techniques de modifications des matériaux, il faut faire la distinction entre 3 termes (réf. 10, 18, 26):

- **Traitement** = terme général pour désigner un procédé consistant à modifier un matériau donné afin qu'il puisse remplir les fonctions auxquelles on le destine.
- **Amélioration** = opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol (augmentation de la portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement. Ce traitement ne donne pas une garantie de durabilité vis-à-vis de l'eau et du gel.
- **Stabilisation** = opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol, de manière à conférer durablement au matériau un état définitif de stabilité à l'eau et au gel. Elle se traduit, entre autres par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. Ces effets pourraient être mis à profit dans le dimensionnement de certaines chaussées, mais n'interviennent pas au niveau des travaux de terrassement.



Chapitre 1
Connaissance des sols et aptitude au traitement

I.1 Introduction

Il est indispensable avant tout démarrage de travaux d'avoir une idée des caractéristiques du sol en présence et d'évaluer ainsi les éventuels problèmes.

Une bonne connaissance du sol permet:

- d'évaluer l'intérêt du traitement de sol;
- de déterminer le type d'agent de traitement à utiliser;
- d'avoir une première idée de la quantité d'agent de traitement à utiliser.

Avant de traiter un sol et de l'utiliser comme matériau de construction, il est indispensable de connaître les principes généraux régissant son comportement.

Pour permettre la compréhension du processus de traitement, nous conseillons au lecteur n'ayant pas/peu de connaissance des différents types de sols, de leurs comportements et de leurs caractéristiques, de se référer à l'annexe A reprenant une description synthétique et didactique des sols.

I.2 Caractérisation des sols

On distingue **trois grandes familles de paramètres** dont la connaissance est capitale pour la caractérisation d'un sol vis-à-vis de son traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (ciment, liants hydrauliques routiers – LHR) (réf. 18, 35):

1. **Les paramètres de nature**. Ils caractérisent ce qui ne varie pas (ou peu) dans le temps ou au cours des manipulations que peut subir le sol:

   - *Granularité*. Les essais de granulométrie permettent de classer les sols en différentes catégories selon la dimension de leurs éléments:

     - sols fins (sables, argiles, limons);
     - sols granulaires;
     - sols mixtes (sols fins à charge pierreuse).

   - *Argilosité*. Elle caractérise à la fois la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. On peut la mesurer à l'aide des paramètres suivants:

     - l'indice de plasticité (Ip);
     - la valeur de bleu de méthylène (MB).

   - *Présence de constituants chimiques particuliers*: des éléments perturbateurs peuvent troubler les réactions entre le sol et l'agent de traitement (matières organiques, sulfates et sulfures, chlorures, nitrates, etc.).

2. **Les paramètres d'état des sols: teneur en eau**. Ces paramètres ne sont pas propres au sol mais sont fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. L'état hydrique conditionne:

   - le choix de l'agent de traitement le mieux adapté et des dosages nécessaires à appliquer;
   - le bon déroulement des réactions entre le sol et l'agent de traitement (réactions d'hydratation et de prise);
   - la qualité de la mise en œuvre (épandage, malaxage, compactage).

3. **Les paramètres de comportement**: fragmentabilité des éléments grossiers et abrasivité de la fraction grenue. Il s'agit de paramètres permettant d'appréhender les difficultés de malaxage (rapidité d'usure et de détérioration des outils, fatigue des machines, etc.). Différents essais ont été proposés pour les mesurer(1), mais on manque encore d'expérience pour en proposer une interprétation rigoureuse.

I.3 Essais

Les différentes études à envisager dans le cadre d'un traitement de sol sont:

1. **Essais d'identification du sol** (I.3.1)

Pour décider de la pertinence d'un traitement de sol, il faut le reconnaître et en prélever des échantillons représentatifs. L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols à traiter:

- granulométrie «simplifiée» (passant à 63 microns et passant à 2 mm) – détermination visuelle du D_{max};
- indice de plasticité (limites d'Atterberg);
- valeur de bleu;
- teneur en eau naturelle;
- présence de matières organiques;
- présence de constituants chimiques particuliers (sulfures, sulfates, chlorures, phosphates et nitrates).

2. **Etude de vérification de l'aptitude d'un sol au traitement** (I.3.2)

- «essai de stabilité des grumeaux»;
- «essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/aux liants hydrauliques» (essai de gonflement);
- «essai de résistance au poinçonnement» (CBR après 4 jours d'immersion).

3. **Etudes de formulation** (I.3.3)

Ces études ont pour but de fixer le dosage optimal en agent de traitement en fonction des teneurs en eau rencontrées. Elles permettent également de tester directement l'efficacité d'un traitement. Il s'agit d'essais de compactage, de portance, de résistance et de sensibilité à l'eau et au gel.

I.3.1 Essais d'identification du sol

La complexité de cette étude d'identification varie avec la diversité géologique du terrain et l'application visée (remblai, sous-fondation, tranchée, fond de coffre, fondation de bâtiment).

Cette étude permet de regrouper les terrains rencontrés en familles homogènes et représentatives et de déterminer l'utilité ou non d'un recours au traitement en fonction de leur teneur en eau.

On peut ainsi (réf. 35, 27):

- éliminer les sols pour lesquels le traitement serait:
  - superflu (le sol non traité est satisfaisant);
  - inopérant (le sol ne réagit pas avec l'agent de traitement);
  - trop onéreux: sols trop humides, trop argileux ou trop pierreux pour le type de traitement envisagé;
- connaître le (ou les) agent(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) à chaque famille de sols pour l'application envisagée;
- sélectionner les échantillons représentatifs avec lesquels seront faites les études de formulation proprement dites;
- évaluer, en première approximation les dosages à apporter.

---

1 - Essai de fragmentabilité *applicable aux matériaux rocheux évolutifs: NF P 94-066*
- Essai d'abrasivité *pour évaluer l'usure des machines dans les matériaux rocheux: NF P 18-579*
- Essai de dégradabilité*: NF P 94-067*

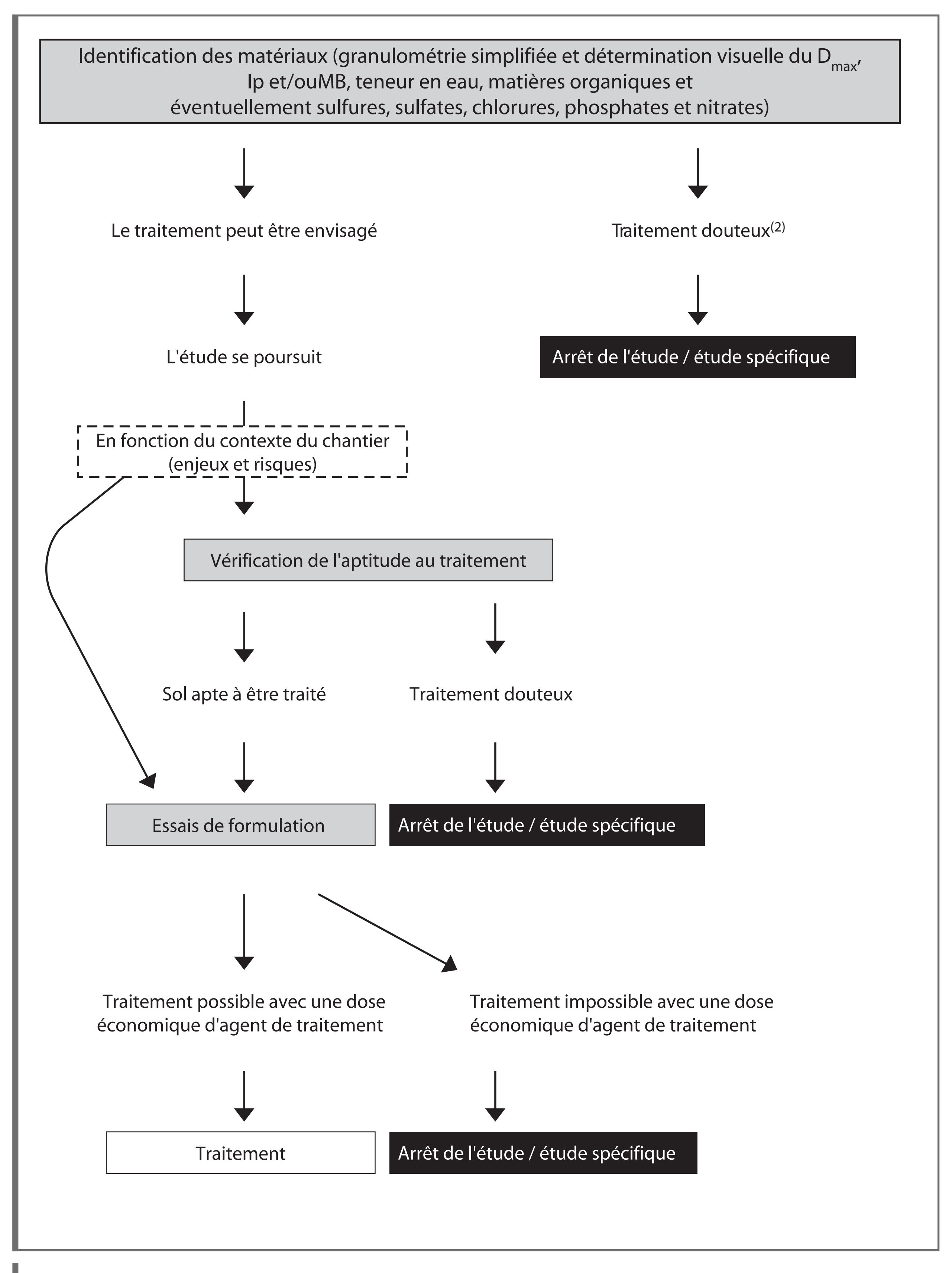


Figure 1 Schéma général des études de formulation

2 *Une illustration de la démarche complète de détermination de la pertinence du traitement sur base d'essais d'identification est reprise dans les différents Guides pratiques pour les différentes applications de traitement de sol.*

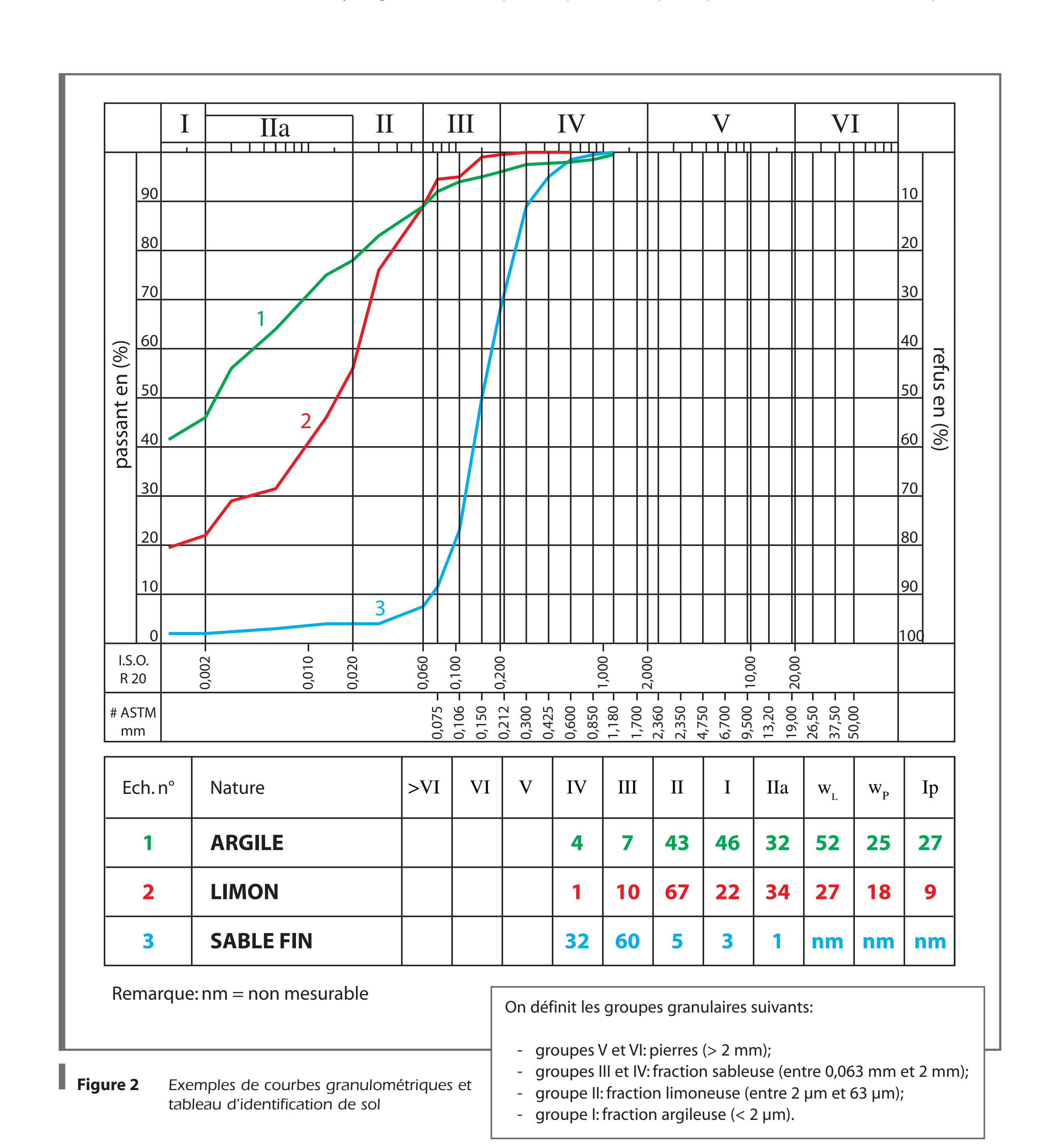
I.3.1.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans un sol. Elle comprend deux opérations:

- tamisage (éléments de dimension ≥ 63 µm);
- sédimentométrie (éléments de dimension < 63 µm).

Les essais de granulométrie aboutissent à l'établissement d'une courbe granulométrique représentant, pour une dimension D donnée, portée en abscisse, le pourcentage des grains de dimension inférieure, en ordonnée (passant) et le pourcentage de grains de dimension supérieure (refus) (voir figure 2).

Pour identifier un sol à traiter, une analyse granulométrique simplifiée est pratiquée. Elle est caractérisée par:



Ech. n°	Nature	>VI	VI	V	IV	III	II	I	IIa	w_L	w_P	Ip
1	**ARGILE**				4	7	43	46	32	52	25	27
2	**LIMON**				1	10	67	22	34	27	18	9
3	**SABLE FIN**				32	60	5	3	1	nm	nm	nm

Remarque: nm = non mesurable

On définit les groupes granulaires suivants:

- groupes V et VI: pierres (> 2 mm);
- groupes III et IV: fraction sableuse (entre 0,063 mm et 2 mm);
- groupe II: fraction limoneuse (entre 2 µm et 63 µm);
- groupe I: fraction argileuse (< 2 µm).

Figure 2 Exemples de courbes granulométriques et tableau d'identification de sol

- Le tamisat (passant) à 63 µm: il détermine la teneur en fines et permet, dans une certaine mesure, d'évaluer le degré de sensibilité à l'eau. Cette caractéristique oriente en partie le choix de l'agent de traitement.
- Le tamisat à 2 mm: il permet de différencier les sols fins, granulaires et mixtes.

Le D_{max} = dimension du plus gros élément présent à moins de 1 % dans le sol. Il détermine les possibilités pratiques du traitement.
Le D_{max} est déterminé par une inspection visuelle. L'analyse granulométrique complète peut donner des informations supplémentaires.

Normes

NBN EN 933-1 (1997)

I.3.1.2 Indice de plasticité (limites d'Atterberg ou de consistance)

L'indice de plasticité est une mesure de l'argilosité. La connaissance de l'argilosité d'un sol est indispensable pour choisir l'agent de traitement adapté au sol considéré. En première approximation, on considère que lorsque l'argilosité est élevée, le choix de la chaux ou un liant hydraulique contenant de la chaux comme agent de traitement s'impose; inversement, lorsque l'argilosité est faible, le ciment ou un liant hydraulique riche en clinker convient comme agent de traitement (le choix de l'agent de traitement approprié est bien entendu également guidé par les performances/résultats à obtenir).

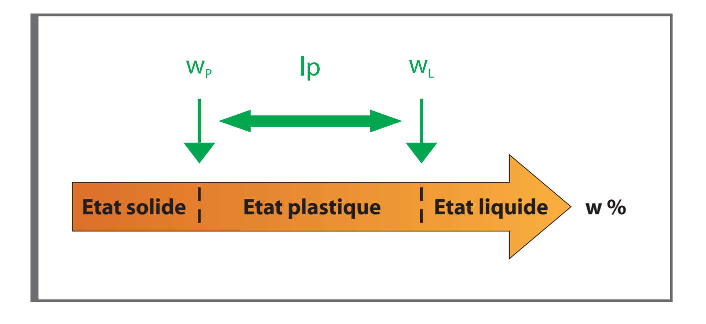
Suivant la quantité d'eau présente dans le sol, on peut définir conventionnellement trois états: liquide, plastique ou solide. Les essais en vue de déterminer les limites d'Atterberg permettent de distinguer ces états en déterminant expérimentalement deux limites caractéristiques:

- **Limite de liquidité** (w_L): teneur en eau relativement élevée à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide.
- **Limite de plasticité** (w_P): teneur en eau relativement faible à laquelle le sol passe de l'état solide à l'état plastique.

La différence de teneur en eau entre les limites de liquidité et de plasticité représente l'indice de plasticité du sol:

$$Ip = w_L - w_P$$

L'indice de plasticité est couramment utilisé pour mesurer l'argilosité. Il représente la plage de teneurs en eau d'un sol donné correspondant à un comportement plastique de ce sol. Ainsi, si l'indice de plasticité du sol est élevé, le sol est dit argileux et ses variations de volume peuvent être importantes en fonction de la modification de la teneur en eau du sol. La relation entre la teneur en eau à l'état naturel et les limites de liquidité et de plasticité traduit le comportement d'un sol.



Principaux seuils indicatifs:

- Ip non mesurable: sol non argileux;
- Ip < 12: sol limoneux à teneur en argile faible;
- Ip = 12 - 25: sol limoneux à teneur en argile moyenne;
- Ip = 25 - 40: sol argileux;
- Ip > 40: sol très argileux.

Les essais s'effectuent sur la fraction du sol inférieure à 0,4 mm (en effet, les éléments les plus fins sont les plus sensibles aux variations de la teneur en eau).

I.3.1.2.a Détermination de la limite de liquidité

On place une pâte de sol (une épaisseur de 15 à 20 mm) dans la coupelle de l'appareil de Casagrande.

La pâte de sol est séparée en deux par une rainure axiale au moyen d'un outil spécial et on applique à la coupelle une série de coups jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent sur à peu près 1 cm. On note le nombre de chocs nécessaires et on détermine la teneur en eau à l'étuve du sol. Les essais sont effectués avec des teneurs en eau croissantes ou décroissantes.



Figure 3 Appareil de Casagrande



Figure 4 Réalisation de la rainure dans la pâte de sol au moyen d'un outil spécial



Figure 5 Fermeture des lèvres sur ± 1cm après application de chocs à la coupelle

La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle on observe une fermeture des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle peut se déterminer graphiquement grâce à 3 ou 4 essais successifs ou, si le nombre de coups est compris entre 15 et 35, à partir d'un seul essai au moyen de la formule:

$$w_L = w\ (N/25)^{0,121}$$

w_L = teneur en eau correspondant à la limite de liquidité;
w = teneur en eau de la pâte de sol;
N = nombre de chocs correspondants à w.

I.3.1.2.b Détermination de la limite de plasticité

On étale une boulette de sol sur un matériau non absorbant ni réactif afin de former à la main un rouleau (de 3 mm de diamètre et 10 à 15 cm de long). La limite de plasticité est la teneur en eau pour laquelle le rouleau se brise lorsqu'on atteint le diamètre de 3 ± 0,5 mm.

Remarques

- Les valeurs d'Ip obtenues doivent être interprétées avec une certaine flexibilité. En effet, les résultats des essais de détermination des limites de liquidité/plasticité sont fortement influencés par la manière dont l'opérateur exécute l'essai ainsi que par l'appareillage utilisé (des essais interlaboratoires ont montré des variations de 25 à 30 % sur l'indice de plasticité).

- La détermination de l'argilosité d'un sol peut également être déterminée par un essai de bleu de méthylène (cf. I.3.1.3 *Valeur de bleu de méthylène*). La valeur de bleu est à utiliser pour les sols peu argileux. L'indice de plasticité est le critère le mieux adapté pour les sols dont l'Ip est ≥ 12.

Normes

NBN CEN ISO/TS 17892-12 (2005)

I.3.1.3 Valeur de bleu de méthylène

La valeur de bleu de méthylène (MB) est une autre mesure de l'argilosité. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer une suspension de sol dans de l'eau, soit, en d'autres termes, la quantité de bleu pouvant s'adsorber sur les particules du sol. Etant donné que ce sont les particules argileuses (< 2 µm) qui ont la plus grande capacité d'adsorber le bleu de méthylène, on a donc par cet essai une estimation globale de la quantité et de l'activité des argiles contenues dans le sol. La MB s'exprime en g de bleu par kilo de sol sec.

<u>Principe</u>

L'échantillon est séché jusqu'à masse constante et pesé. Il est passé au tamis et mis en suspension dans de l'eau. On ajoute une solution de bleu de méthylène (concentration: 10 g/l) à la suspension sous agitation permanente. On détermine la quantité de solution de bleu de méthylène nécessaire pour saturer la suspension. Le point de saturation est déterminé par un essai à la tache dans lequel une goutte de suspension est posée sur un papier filtre. Si la tache formée sur le papier reste entourée durant cinq minutes par un cercle bleu clair, on considère que le point de saturation est atteint.

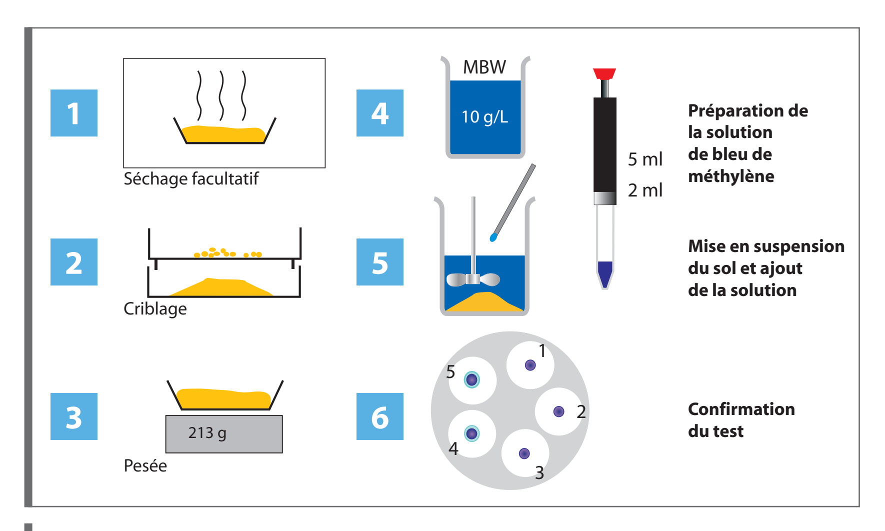


Figure 6 Aperçu schématique de l'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène (d'après CEN test methods (1) - MAT 1 - CT 93-0040 (1993-1997) DGXII of the European Commission)

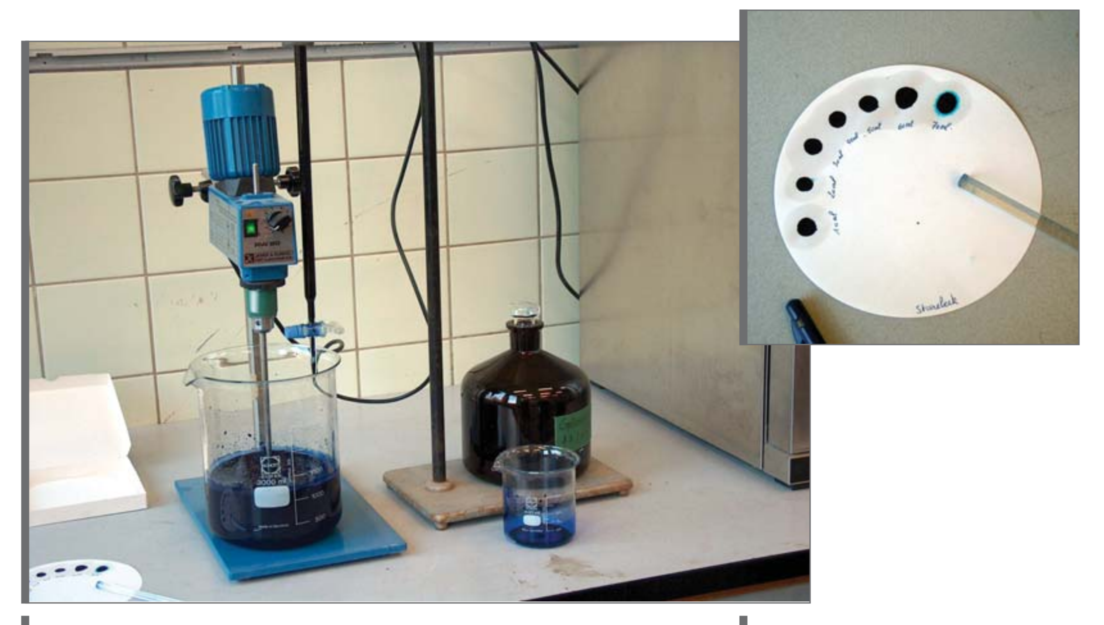


Figure 7 Appareillage pour essai au bleu de méthylène

Figure 8 Essai au bleu de méthylène à la tache

Principaux seuils indicatifs:

- MB ≤ 25: sols faiblement argileux;
- MB > 60: sols très argileux.

Les essais s'effectuent sur la fraction 0/2 mm (NBN EN 933-9).

Normes

NBN EN 933-9 (1998)

Remarques

- La norme européenne (NBN EN 933-9) mentionnée ci-dessus précise la méthode de détermination de la MB de la fraction 0/2 mm dans les **sables ou le tout-venant.** La norme française (NF P94-068), quant à elle, précise le mode opératoire pour la détermination de la valeur au bleu de méthylène d'un sol (VBS) de la fraction 0/50 mm dans les **sols ou les matériaux rocheux.** En outre, la norme européenne exprime les résultats en grammes de bleu de méthylène par kilogramme de matériau sec alors que la norme française exprime les résultats en grammes de bleu par 100g de matériau sec. **Il y a donc un facteur 10 de différence entre les valeurs de valeur au bleu selon que l'on utilise la norme européenne ou française**! On peut admettre une correspondance approchée entre ces deux mesures du type:

  VBS = 0,1 x (MB) x (tamisat à 2 mm) / 100

  Dans ce document, ainsi que dans les fascicules pratiques qui le complètent, les valeurs de MB mentionnées sont exprimées selon la norme européenne (en g de bleu/kg de matériau sec).
- La MB est à utiliser pour les sols peu argileux. L'indice de plasticité est le critère le mieux adapté pour les sols dont l'Ip est ≥ 12.

I.3.1.4 Teneur en eau

La teneur en eau (w) d'un sol représente la masse d'eau contenue dans ce sol. Elle varie selon sa nature, sa position, la profondeur ainsi qu'au cours du temps.

La teneur en eau d'un sol est définie par le rapport (en %) entre la masse d'eau du sol et la masse du sol sec:

$$w = 100 \times \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

M_h = masse du sol humide;
M_s = masse du sol sec.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la teneur en eau d'un sol, parmi lesquelles:

1. Essais effectués en laboratoire:

- *méthode d'étuvage*: on pèse l'échantillon de sol avant et après passage à l'étuve (105°C) jusqu'à masse constante (différence de masse entre deux pesées inférieure à 0,1 %);
- *dessiccation au four à micro-ondes*: on pèse l'échantillon de sol avant et après passage au four à micro-ondes jusqu'à masse constante;

2. Essais effectués sur chantier:

- *brûlage à l'alcool*: on pèse l'échantillon de sol avant et après l'avoir fait brûler (en ajoutant de l'alcool à brûler). Cette technique est à proscrire pour les sols riches en matières organiques car elle détruit les composés organiques présents dans le sol;

- *Speedy Moisture Tester*: le sol est inséré dans le testeur et mis en contact avec un réactif (carbure de calcium) qui induit la vaporisation de l'eau (sous forme de gaz acétylène), entraînant une augmentation de la pression dans l'appareil. La teneur en eau de l'échantillon est alors lue directement sur l'appareil calibré sur base de la pression du gaz. Cet appareil n'est à utiliser que pour la détermination des teneurs en eau des sols sableux.

La décision de traiter ou non un sol dépend, outre des caractéristiques de nature du sol, de l'état hydrique des matériaux au moment du traitement.

Pour caractériser l'état hydrique du sol (à l'extraction), la détermination de la teneur en eau naturelle seule est insuffisante, on utilise les paramètres suivants:

- le **rapport w_{nat}/w_{OPN}** (teneur en eau naturelle/teneur en eau à l'optimum Proctor normal du sol considéré). L'essai Proctor est décrit au chapitre I.3.3.1.c *Essais Proctor*; ce paramètre est le mieux adapté pour caractériser les états hydriques «moyen», «sec» et «très sec».

- l'**indice portant immédiat** (IPI) du sol à sa teneur en eau naturelle. Ce paramètre traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. L'IPI exprime la valeur de l'indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle. L'essai de détermination de l'IPI est décrit au chapitre I.3.3.1.e *Essais IPI*; ce paramètre est le mieux adapté pour caractériser les états hydriques «humides» et «très humides».

- l'**indice de consistance** (Ic). Il permet de caractériser la consistance d'un sol:

$$Ic = \frac{w_L - w_{nat}}{w_L - w_P}$$

w_L = limite de liquidité;
w_P = limite de plasticité.

  - Ic inférieur à une valeur de l'ordre de 0,7: sols peu consistants avec lesquels on risque d'avoir des problèmes de traficabilité;
  - Ic supérieur à une valeur de l'ordre de 1,3: sols de consistance élevée avec lesquels on risque d'être confronté à des problèmes d'extraction.

  L'indice de consistance est bien adapté pour caractériser l'état hydrique des sols dont le passant au tamis de 63 µm est > 35 % et dont l'Ip est > 12.

Normes

Teneur en eau: NBN EN 1097-5 (2008)

I.3.1.5 Détermination de la teneur en matières organiques et autres constituants chimiques particuliers

La présence de certaines substances peut avoir un effet négatif sur l'efficacité de l'agent de traitement:

- **matières organiques**: elles peuvent retarder ou annuler l'effet du traitement en consommant une quantité plus ou moins grande de l'agent de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu. Les matières organiques sont surtout présentes en surface. Si la teneur en matières organiques d'un sol est supérieure à 3 %, une étude spécifique doit être réalisée pour estimer les effets des matières organiques sur le traitement (réf. 16);
- **sulfates** (gypse, plâtre), **sulfures** (pyrites): ils peuvent entraîner des gonflements par formation d'ettringite (espèce cristalline très gonflante). Leur présence dans le sol est susceptible d'entraîner une instabilité volumique en milieu humide et la destruction de la prise hydraulique. On admet couramment dans la littérature technique qu'au-delà d'une teneur en sulfates de l'ordre de 1 % on risque de rencontrer des problèmes de gonflement (réf. 34);
- **phosphates**, **nitrates** (engrais): ils inhibent ou retardent la prise hydraulique;
- **chlorures** (sel de gemme): ils accélèrent la prise et le durcissement avec possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates.

Normes

Matières organiques
La teneur en matières organiques peut être déterminée par la norme NBN 589-207 (essais à l'H_2O_2 ou $K_2Cr_2O_7$) ou la norme NBN EN 1744-1§15.1 (détermination des acides humiques par réaction avec NaOH). Les résultats obtenus diffèrent selon la méthode utilisée. La méthode décrite par la norme NBN EN 1744-1, §15.1 donne un résultat qualitatif (comparaison par rapport à une solution étalon).

Certains laboratoires utilisent une méthode non normalisée basée sur la détermination du carbone total (carbone organique + carbone inorganique) au moyen d'un analyseur carbone-soufre et du carbone inorganique par dosage volumétrique (mesure du volume de CO_2 dégagé par une attaque acide du sol à température et pression contrôlées). Le carbone organique est déduit à partir de ces deux mesures, ce qui permet de déduire par calcul la quantité de matières organiques.

Soufre total
La teneur en soufre total est déterminée selon la norme NBN EN 1744-1, § 11 (1998) *Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique*.

Nitrates
Le dosage en nitrates peut être déterminé par méthode manuelle ou automatisée:

- ISO/TS 14256-1 *Qualité du sol – Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans les sols humides par extraction avec une solution de chlorure de potassium – Partie 1: Méthode manuelle*;
- ISO/TS 14256-2 *Qualité du sol – Dosage des nitrates, nitrites et de l'ammonium dans les sols humides par extraction avec une solution de chlorure de potassium – Partie 2: Méthode automatisée*.

Phosphates
Le dosage en phosphore peut être déterminé selon la norme 11263 (1994) *Qualité du sol – Dosage du phosphore – Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium*.

Il est à noter que des méthodes non normalisées sont couramment appliquées:

- en région wallonne, on peut citer une méthode à l'acétate ammonique EDTA à pH 4,65 (Lakanen et Ervio, 1972) (réf. 51);
- en région flamande, on peut citer une méthode à l'acétate lactate en présence d'acide acétique (Egner et al., 1960) (réf. 50).

Ions chlore
Le dosage des ions chlore est réalisé selon la norme NBN EN 1744-1, § 7 (1998) *Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique – Détermination des chlorures solubles dans l'eau avec la méthode de Volhard (méthode de référence)*.

La présence de ces éléments dans le sol peut être naturelle (genèse géologique) ou accidentelle (origine anthropique: pollution, sels de déneigement, etc.).

En raison de la complexité des méthodes de mesure et de la faible représentativité des prises d'essai, la détection de ces substances ne doit être envisagée que lorsqu'un doute existe sur la possibilité de présence de ces constituants dans le sol, soit suite à la reconnaissance du site et à l'examen de la documentation disponible sur le site et les sites environnants, soit après réalisation d'essais d'aptitude ayant révélé des risques de gonflement.

I.3.2 Essais de vérification de l'aptitude des sols au traitement

Ces essais sont des essais indicatifs permettant de déterminer rapidement les possibilités de traitement d'un sol. Ils permettent d'évaluer, dans l'étude préliminaire, l'intérêt de la poursuite des essais (essais de formulation).

Les essais de vérification ne sont pas réalisés systématiquement dans le cadre des études préliminaires de laboratoire. La décision de leur exécution dépend du contexte particulier du chantier (enjeux et risques).

Si ces essais révèlent des problèmes lors du traitement, il faudra, selon la situation, soit stopper l'étude préliminaire et abandonner l'idée du traitement, soit aller plus loin dans la détermination du problème et entreprendre une étude plus approfondie.

I.3.2.1 Essai de stabilité des grumeaux (réf. 5, 29)

Cet essai se base sur l'augmentation de la stabilité à l'eau des grumeaux produite par la chaux. La mesure de cette augmentation permet d'apprécier l'aptitude de la plupart des sols à l'**amélioration à la chaux**.

La méthode consiste à tamiser sous eau, sur un tamis à ouverture de maille fine animé d'un mouvement sinusoïdal, des grumeaux humides de sol traité et de sol non traité. Cette opération peut se faire soit manuellement, soit au moyen d'une machine spéciale (développée au CRR). Les grumeaux de sol non traité se désintègrent et disparaissent à travers les mailles du tamis alors que les grumeaux de sol traité restent sur le tamis. On définit la stabilité des grumeaux par la différence entre les deux refus restant sur les tamis.

Ce mode opératoire ne demande qu'un échantillon de 1 kg de sol à examiner et ne prend qu'une à deux heures de temps d'opérateur.
Cet essai, de par sa rapidité et sa simplicité, est intéressant comme test d'appréciation de l'aptitude des sols à l'amélioration à la chaux.

Mode opératoire

Stabilité des grumeaux: méthode de mesure CRR MF 34/73

I.3.2.2 Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/aux liants hydrauliques

Cet essai renseigne sur la possibilité de gonflements ettringitiques du sol induits par un traitement d'**amélioration** ou de **stabilisation** (chaux et/ou liant hydraulique). L'essai consiste à mesurer les variations de volume d'une éprouvette de sol traité au cours du temps. Les conditions de conservation de l'échantillon sont telles que les réactions induites par un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique sont accélérées. On peut ainsi estimer les risques de gonflements éventuels induits par un traitement.

On considère que si le gonflement volumique est supérieur à 5 %, le sol ne peut être traité ou une recherche approfondie doit être réalisée.

Pour les sols **stabilisés au ciment**, l'interprétation de cet essai pourra être complétée par les résultats d'essais de résistance à la traction indirecte[3] (R_{it}). On considère que si $R_{it} < 0,2$ MPa, le sol ne peut être traité ou une recherche approfondie doit être réalisée.

Normes

Gonflement volumique: NBN EN 13286-49 (2004)
Résistance à la traction indirecte: NBN EN 13286-42 (2003)

[3] *La description de l'essai de résistance à la traction indirecte est détaillée au chapitre I.3.3.2* Résistance à la traction indirecte.

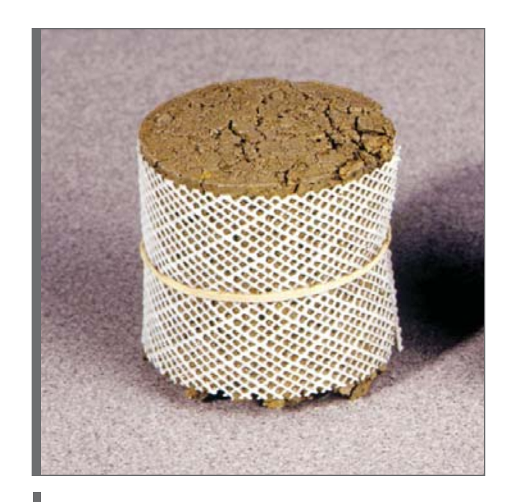


Figure 9 Eprouvette soumise à l'essai de gonflement

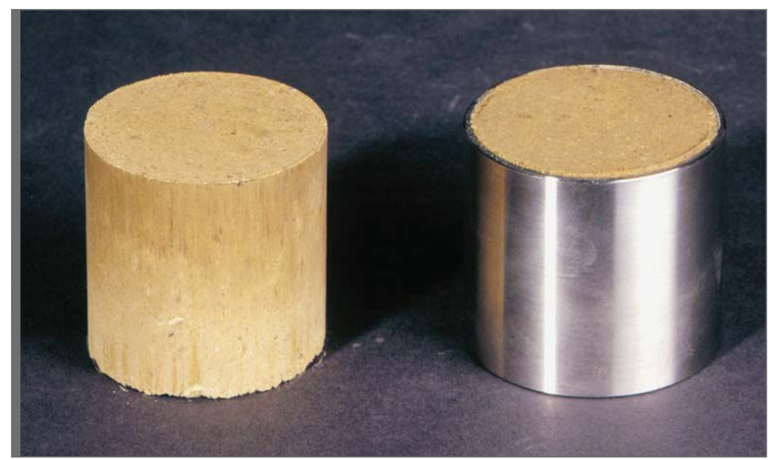


Figure 10 Eprouvettes destinées à la mesure du niveau de résistance

I.3.2.3 Essai de résistance au poinçonnement (CBR après 4 jours d'immersion)

L'essai CBR après 4 jours d'immersion est réalisé sur des échantillons de sol traité compactés à l'énergie Proctor normal et immergés dans l'eau pendant 4 jours à 20 °C[4].

Outre la détermination de l'indice CBR, cet essai permet de déterminer la valeur du gonflement linéaire de l'éprouvette observé après 4 jours d'immersion.

I.3.3 Etude de formulation

L'étude de formulation consiste, pour un sol donné, à étudier l'évolution des performances mécaniques du sol traité en fonction du temps, et ce pour différents dosages en agent de traitement, dans la plage de teneurs en eau qu'il est prévisible de constater sur chantier, pour les compacités à réaliser. Elle aboutit au choix du ou des agent(s) de traitement approprié(s) et des dosages à appliquer en fonction des objectifs visés.

Les résultats des études de formulation se traduisent par des abaques donnant, en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution, les dosages en agent de traitement à appliquer à un sol pour atteindre les caractéristiques mécaniques recherchées (portance, compacité, résistance, sensibilité à l'eau et au gel). Ces abaques seront éventuellement complétés par les observations recueillies sur les planches d'essai (cf. chapitre III.3 *Planche d'essai*) permettant l'élaboration de la grille de traitement directement utilisable sur chantier.

I.3.3.1 Portance/compacité

L'étude de formulation est menée en deux phases pour chaque famille représentative de sols: la première phase concerne le sol naturel et la seconde phase le sol traité.

I.3.3.1.a Sur les matériaux naturels

Préparation des matériaux
Le sol est séché, soit à l'air ambiant, soit à l'étuve. Pour éviter de modifier les caractéristiques du sol, on évitera de dépasser des températures de 50 °C.

Après séchage, le sol est homogénéisé et, si nécessaire, émietté jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'agrégats supérieurs à 2 mm[5].

Le sol est soumis aux essais suivants
On détermine la **courbe Proctor** normal (minimum 5 points) en essayant d'encadrer les teneurs en eau prévisibles au moment des travaux. On veillera également à avoir des points situés de part et d'autre de l'optimum Proctor (du côté humide et du côté sec).

4 *La description de l'essai CBR est reprise au chapitre I.3.3.1.d* Essais CBR.
5 *Cette valeur de 2 mm n'est à prendre en considération que pour les sols fins.*

L'**indice CBR** ou **IPI** est ensuite déterminé sur chacune des éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbe Proctor. Les valeurs trouvées sont reportées sur des graphes de variation de portance en fonction des teneurs en eau.

I.3.3.1.b Sur les matériaux traités

Préparation des matériaux

a) Le sol est séché, soit à l'air ambiant, soit à l'étuve. Pour éviter de modifier les caractéristiques du sol, on évitera de dépasser des températures de 50°C. Comme pour la préparation du matériau naturel, le sol est ensuite homogénéisé et, si nécessaire, émietté.

b) Les échantillons de sol sont mélangés à des doses croissantes de produit de traitement (choisies dans un domaine économique réaliste) pour 4 teneurs en eau (choisies dans la plage des teneurs en eau prévisibles au moment des travaux). Ici encore, on veillera à encadrer la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor.
Le sol et l'agent de traitement sont mélangés jusqu'à obtention d'un mélange homogène (pour les sols argileux, difficiles à malaxer, le malaxage peut être réalisé à l'aide de malaxeurs désagrégateurs).

c) Conservation des mélanges:

- Pour un traitement à la chaux et aux LHR: les mélanges sont conservés pendant deux heures sous emballage fermé hermétiquement.
- Pour un traitement au ciment, il n'y a pas de conservation du mélange (voir d).

d) Compactage:

- Pour un traitement à la chaux et aux LHR: deux heures après l'incorporation de l'agent de traitement, la teneur en eau de chacun des mélanges est mesurée et les différents mélanges sont compactés à l'énergie Proctor normal.
- Pour un traitement au ciment: directement après l'incorporation de l'agent de traitement, la teneur en eau de chacun des mélanges est mesurée et les différents mélanges sont compactés à l'énergie Proctor normal.

Le sol est soumis aux essais suivants
Sur les mélanges compactés est déterminée la **courbe Proctor**.

L'**indice CBR** ou **IPI** est mesuré, après un délai qui dépend de l'application, sur chacune des éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbe Proctor. On peut ainsi tracer une courbe de variation de l'indice CBR ou IPI en fonction de la teneur en eau au compactage pour chaque dosage en agent de traitement. L'examen de cette courbe permet de donner une idée de l'efficacité du traitement (les courbes d'un sol réagissant bien doivent se trouver au-dessus de celle du sol non traité)[6].

I.3.3.1.c Essais Proctor

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau (w, exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche ρ_d en g/cm^3 ou en kg/m^3).

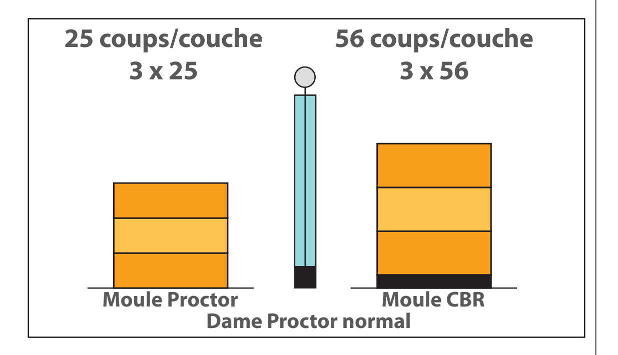
Conditions d'essai
Le matériau est porté à différentes teneurs en eau et chacun des mélanges est ensuite compacté par couche dans un moule cylindrique au moyen d'un marteau de dimension et de masse normalisées que l'on laisse tomber librement d'une hauteur normalisée. La masse volumique sèche de l'échantillon ainsi compacté est déterminée pour chaque teneur en eau.

Résultats
Les résultats sont traduits sous forme d'un graphique reprenant, en abscisse la teneur en eau au compactage et en ordonnée la masse volumique sèche[7]. La courbe obtenue présente une forme en cloche, plus ou moins aplatie selon le type de sol (granulométrie, sensibilité à l'eau). Pour des sols de même granulométrie, la courbe sera

6 *La réalisation de cette courbe n'est pas indispensable pour la détermination du dosage en agent de traitement, mais elle est conseillée pour avoir un aperçu des performances du sol traité.*
7 *Pour la présentation des résultats, il convient de respecter l'échelle suivante: en abscisse: 1 cm = 1 %; en ordonnée: 2 cm = 0,1 g/cm³.*

Proctor normal

Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR
Masse de la dame	2 500 g	2 500 g
Diamètre de la dame	50 mm	50 mm
Hauteur de chute	305 mm	305 mm
Nombre de couches	3	3
Nombre de coups par couche	25	56
Masse par couche	650 g	1 700 g



Proctor modifié

Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR
Masse de la dame	4 500 g	4 500 g
Diamètre de la dame	50 mm	50 mm
Hauteur de chute	457 mm	457 mm
Nombre de couches	5	5
Nombre de coups par couche	25	56
Masse par couche	400 g	1 050 g

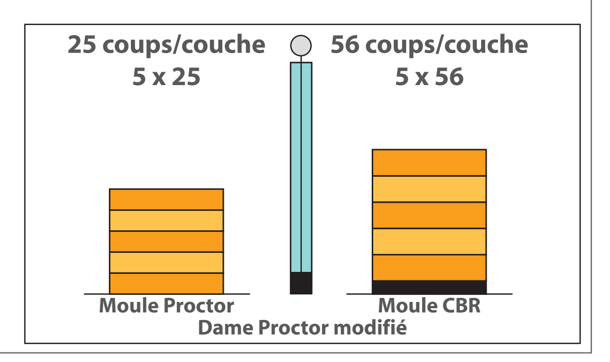


Tableau 1 *Modalités d'exécution pour les essais Proctor normal et modifié*

plus aplatie pour les matériaux dont les caractéristiques de compactage sont peu sensibles à la teneur en eau (comme les sables) et plus pointue pour les matériaux dont les caractéristiques de compactage sont influencées par la teneur en eau (comme les matériaux argileux).

Cette courbe passe par un maximum, aussi appelé Optimum Proctor (cf. figure 14, page 18). A l'optimum Proctor correspond la teneur en eau optimale permettant d'atteindre la compactibilité maximale pour un sol donné et pour un mode de compactage déterminé.

On voit l'importance, aux plans pratique et économique, de la connaissance de la courbe Proctor. Elle permet de déterminer l'état hydrique du sol par comparaison des teneurs en eau naturelles (w_n) avec la teneur en eau optimale:

- $w_n < w_{OPN}$: matériau sec pouvant nécessiter un arrosage;
- $w_n > w_{OPN}$: matériau humide pouvant nécessiter un traitement par un produit adapté.



Figure 11
Dame Proctor

On distingue deux types d'essais Proctor suivant l'énergie de compactage appliquée, à savoir l'essai Proctor normal (0,6 MJ/m^3) et l'essai Proctor modifié (2,7 MJ/m^3).
L'essai Proctor normal se pratique pour les sols entrant dans la constitution de remblais, fond de coffre et arase de remblai. On désigne les résultats de l'essai par $\rho_{d\ OPN}$ et w_{OPN}. Les valeurs de $\rho_{d\ OPN}$ sont utilisées pour évaluer la qualité du compactage. En remblai ou fond de coffre, les densités sèches sont respectivement supérieures à 95 % OPN et 98 % OPN.

Remarque

- L'essai Proctor normal correspond à un compactage modéré, qui peut être reproduit assez facilement sur chantier.
  L'essai Proctor modifié correspond à un compactage plus important (l'énergie de compactage est 4,5 fois plus importante que pour le Proctor normal), qui correspond mieux à celui de chantiers opérant avec des engins lourds. La courbe obtenue se situe au-dessus de la précédente et la densité optimale plus élevée est

obtenue avec une teneur en eau plus faible. L'essai Proctor modifié se pratique pour les empierrements destinés à la réalisation de fondations et sous-fondations, il n'est pas utilisé pour les sols fins. On désigne les résultats de l'essai par $\rho_{d\ OPM}$ et w_{OPM}.

Il convient de bien garder à l'esprit que les résultats observés en laboratoire ne seront pas nécessairement obtenus en pratique en raison de l'importance sur chantier de la portance de la couche sous-jacente, de l'exécution et du matériel utilisé. De plus, l'essai en laboratoire est réalisé sur des mélanges dont le D_{max} est inférieur à 20 mm, ce qui n'est pas nécessairement le cas sur chantier.

Mode opératoire

NBN EN 13286-2 (2004)

I.3.3.1.d Essais CBR (California Bearing Ratio)

L'essai CBR permet de mesurer la portance d'un matériau compacté. Il consiste à comparer la résistance au poinçonnement d'un matériau à tester à celle d'un matériau de référence californien (grave naturelle).

Ce matériau est tel que l'on observe:
- un enfoncement de 2,5 mm pour une force de 13,2 kN;
- un enfoncement de 5 mm pour une force de 20 kN.



Figure 12
Moule CBR

Conditions d'essai
L'essai est réalisé en enfonçant à vitesse constante un poinçon cylindrique dans l'axe de l'éprouvette à la cadence normalisée de 1,27 mm/min dans des éprouvettes de sol compactées à l'énergie Proctor (normal ou modifié) dans des moules CBR.

On mesure en continu la force appliquée en fonction de l'enfoncement du poinçon (généralement jusqu'à 10 mm). Pendant cet essai, une surcharge est placée à la surface de l'éprouvette afin de simuler la surcharge que la structure de la route exercera.

Après l'essai, on détermine l'effort de pénétration à appliquer au sol pour observer des enfoncements de 2,5 et 5 mm (respectivement P2,5 et P5).

Le poinçonnement est réalisé sur toutes les éprouvettes de l'essai Proctor, on peut ainsi établir un graphique CBR/teneur en eau au compactage (cf. figure 14, page 18).

Résultats
Les forces correspondant à des enfoncements de 2,5 mm et de 5 mm sont rapportées aux valeurs de 13,2 et 20 kN, qui sont les valeurs des contraintes à ces mêmes enfoncements pour un matériau de référence. L'indice CBR (exprimé en %) est défini comme étant la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$\frac{100 \times F\ (2{,}5\ mm)}{13{,}2}$$

ou

$$\frac{100 \times F\ (5\ mm)}{20}$$

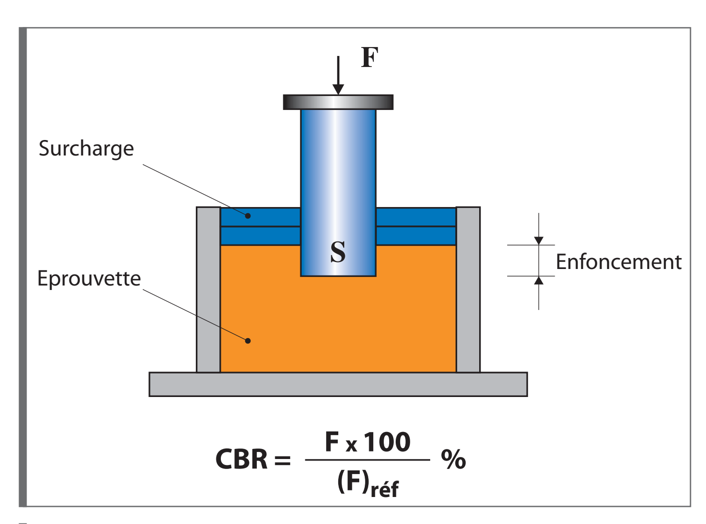


Figure 13 *Schéma de principe de l'essai CBR*

Trois types d'indices CBR sont à distinguer:

- **CBR immédiat:** il correspond au poinçonnement d'une éprouvette confectionnée immédiatement après son compactage;
- **CBR après plusieurs jours** (généralement 3 ou 7 jours selon l'application);
- **CBR après immersion:** il correspond au poinçonnement d'une éprouvette confectionnée après immersion dans l'eau durant 4 jours à 20°C. Ceci simule un sol humidifié après son compactage en place.

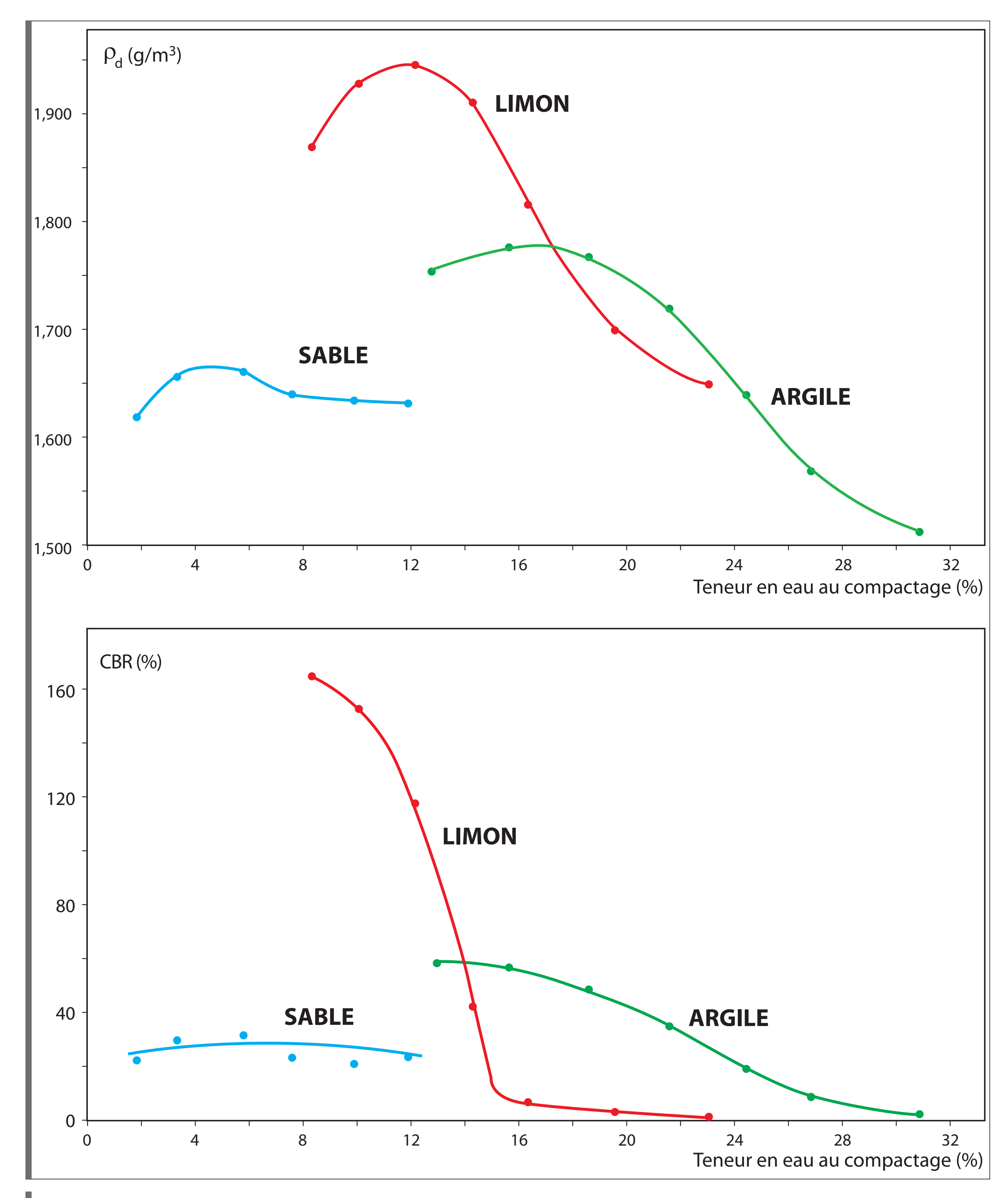


Figure 14 Courbes Proctor modifié et CBR

I.3.3.1.e Essais IPI (Indice Portant Immédiat)

L'indice portant immédiat est une variante de l'indice CBR. Il exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharges, ni immersion sur une éprouvette de sol compactée à l'énergie Proctor normal. Il permet d'évaluer globalement la portance et l'aptitude d'un sol à être compacté et réglé puis à supporter le trafic de chantier ultérieur. On voit l'intérêt au plan pratique de la connaissance de l'IPI qui peut lui aussi renseigner sur l'état hydrique du sol:

- **IPI élevé**: matériau de portance élevée, pouvant nécessiter un arrosage s'il est sec;
- **IPI faible**: matériau de portance faible, pouvant nécessiter un traitement par un produit adapté.

Mode opératoire

NBN EN 13286-47 (2004)

I.3.3.2 Résistance à la traction indirecte (R_{it})

L'essai de traction indirecte, aussi connu par le terme «essai brésilien», vise à déterminer la contrainte de rupture d'une éprouvette soumise à un effort de compression appliqué sur deux génératrices opposées. Il s'agit donc d'un essai de traction car les contraintes induites sont en majorité des contraintes de traction.

Principe

Les éprouvettes sont compactées à une densité correspondant à celle prévue dans le cahier de charges, ou réalisable sur chantier.

Après conservation, les éprouvettes sont soumises à un essai de traction indirecte. Des bandes de chargement (épaisseur 4 mm ± 1 mm) sont à utiliser afin de bien répartir la charge sur toute la longueur de l'éprouvette.

La mise en charge de l'éprouvette se fera de manière continue, uniforme et sans chocs, avec une vitesse de chargement $< 0{,}2$ N/mm^2 s (ou MPa/s).

La résistance à la traction indirecte R_{it} (en N/mm^2) peut être calculée comme suit:

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD}$$

F = force maximale à la rupture (N);
H = longueur de l'éprouvette (mm);
D = diamètre de l'éprouvette (mm).

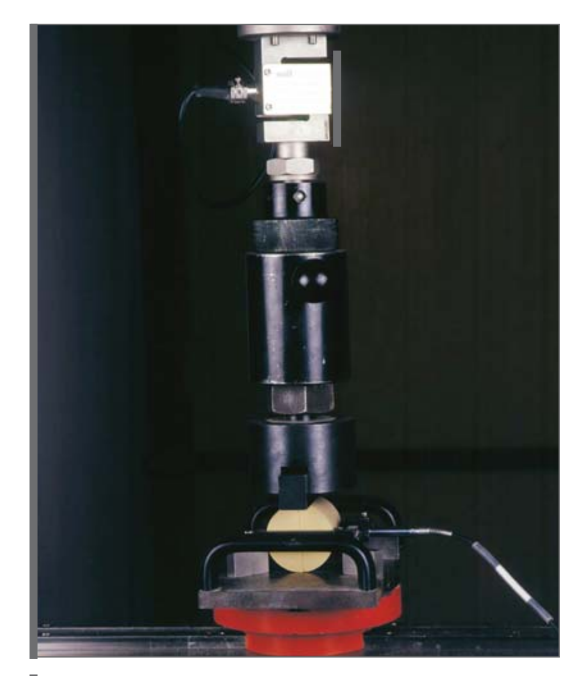


Figure 15 Détermination de la résistance à la traction indirecte



Figure 16 Moulage utilisé pour la confection des éprouvettes destinées à évaluer la résistance à la traction indirecte

Application
La valeur déterminée R_{it} permet:

- de vérifier la tenue au gel du matériau stabilisé. On considère que la résistance au gel est obtenue lorsque la résistance à la traction indirecte R_{it} du sol traité (déterminée sur des éprouvettes d'élancement 1 ou 2 compactées selon l'une des méthodes de compactage décrites dans la norme; en pratique, les éprouvettes ont un élancement de 1), à l'âge correspondant à la date d'apparition présumée du gel sur chantier, est $\geq$ 0,25 MPa (réf. 8);
- de déduire la résistance en traction directe $R_t = 0,8\ R_{it}$. Cette résistance R_t servira comme base d'un calcul de dimensionnement de structure. Dans ce cas, il faudra aussi déterminer le module élastique E, qui peut être directement déduit d'un essai de traction indirecte. Le module élastique E peut aussi être déduit d'un essai de compression.

Mode opératoire

NBN EN 13286-42 (2003)

I.3.3.3 Résistance à la compression simple (R_c)

L'essai de compression simple vise à déterminer la résistance à la compression (R_c) d'un matériau compacté et stabilisé. L'essai consiste à appliquer une pression verticale sur une éprouvette (cylindrique ou cubique) compactée et conservée pendant une période déterminée et à l'augmenter progressivement jusqu'à la rupture.

Principe
Les éprouvettes sont compactées, à une densité correspondant à celle prévue dans le cahier de charges, ou réalisable sur chantier. Après conservation, les éprouvettes sont déposées sur les deux plateaux d'une presse et soumises à des charges croissantes jusqu'à rupture. La mise en charge de l'éprouvette se fait en continu, de manière à ce que la rupture se produise entre 30 et 60 secondes après le début de l'application de la charge.
La résistance à la compression (en N/mm^2 ou MPa) peut être calculée comme suit:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

F = force maximale à la rupture (N);
A_c = section transversale de l'éprouvette (mm^2).

Application
- La valeur déterminée R_c permet de vérifier la tenue au gel du matériau stabilisé. On considère que la résistance au gel est obtenue lorsque la résistance en compression directe R_c du sol traité (déterminée sur des éprouvettes cylindriques d'élancement 1 ou 2 compactées selon l'une des méthodes de compactage décrites dans la norme; en pratique, les éprouvettes ont un élancement de 2), à l'âge correspondant à la date d'apparition présumée du gel sur chantier, est $\geq$ 2,5 MPa (réf. 8).

- La résistance à la compression peut également permettre d'évaluer la sensibilité à l'immersion d'un matériau. La résistance à l'immersion d'un matériau est évaluée par le rapport R_{ci}/R_{c60}, avec:

  - R_{ci} = résistance à la compression à 28 jours de cure normale + 32 jours d'immersion dans de l'eau à 20 °C;
  - R_{c60} = résistance à la compression à 60 jours de cure normale.

  Remarque
  - La cure normale est une cure à l'air à une température de 20 °C.

  On considère que la résistance à l'immersion est obtenue lorsque le rapport: R_{ci}/R_{c60} est > 0,80 (ou lorsque R_{ci}/R_{c60} > 0,60 si la MB[8] > 6) (réf. 8).

Mode opératoire

NBN EN 13 286-41 (2003)

8 *Exprimée en g de bleu de méthylène par kg matériau sec.*

I.3.3.4 Détermination du dosage

Les résultats des essais Proctor et CBR ou IPI permettent d'établir des courbes de variation CBR ou IPI en fonction des doses d'agent de traitement pour les différentes teneurs en eau au compactage. Cette courbe sert de base à l'élaboration d'un graphique représentant la dose d'agent de traitement requise en fonction de la teneur en eau du sol pour différents niveaux de CBR ou IPI. C'est ce graphique qui va être utilisé pour déterminer le dosage en agent de traitement le plus approprié pour le but poursuivi (compacité désirée/niveau de portance visé) à partir de la teneur en eau naturelle du sol au moment des travaux.

Les mesures de teneur en eau du sol en place se font au fur et à mesure de l'avancement des travaux et chaque fois que les conditions météorologiques entraînent une modification des teneurs en eau.

On peut arriver à une conclusion négative quant à l'aptitude du sol examiné au traitement, pour l'une ou l'autre des raisons suivantes:

- réactivité insuffisante du sol: si l'addition d'une dose économique d'agent de traitement ne produit pas une modification notable de la courbe Proctor normal et de la courbe des indices CBR ou IPI, on en conclura que le sol réagit insuffisamment avec l'agent de traitement;

- teneur en eau naturelle trop élevée: il peut arriver que le sol réagisse bien avec l'agent de traitement mais que néanmoins la teneur en eau, malgré la réduction résultant du traitement, reste trop élevée pour permettre l'obtention de la compacité et de l'indice CBR ou IPI voulus.

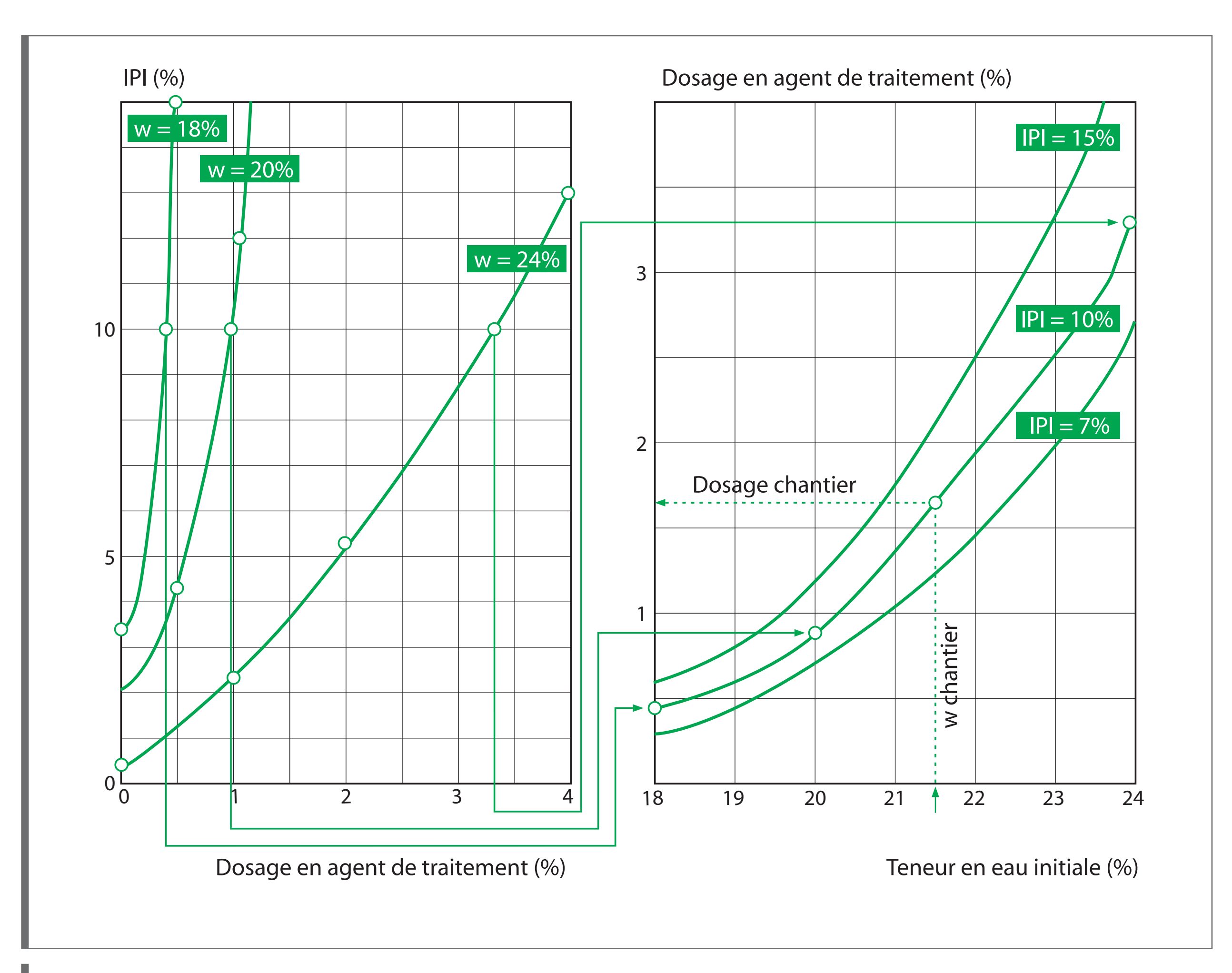


Figure 17 *Exemple d'une étude de formulation en vue d'une amélioration (réf. 8). Pour atteindre un IPI de 10 minimum, la dose d'agent de traitement à incorporer est de 1,7 % pour une teneur en eau du sol en place de 21,5 %.*



Chapitre 2
Traitement des sols

II.1 Introduction

La technique du traitement des sols à la chaux est connue de longue date (elle a été utilisée dans la réalisation de nombreux ouvrages tels que la Muraille de Chine, les chaussées romaines, etc.). Le traitement des sols au ciment est quant à lui plus récent puisque la fabrication du ciment remonte aux environs de 1830. Le traitement des sols est apparu en Belgique dans les années 1960 (programme autoroutier). L'apparition des liants hydrauliques routiers remonte aux années 1980.

Le traitement des sols permet d'utiliser des sols qui, dans leur état naturel, ne peuvent être mis en œuvre (difficultés de réaliser des travaux de terrassement, problèmes de circulation des véhicules, difficulté d'obtention d'une compacité suffisante) et évite ainsi le recours à des solutions coûteuses (mise en décharge de terres excavées et apport de matériaux de remplacement).

Les avantages du **recyclage des sols** se situent à trois niveaux:

- **environnemental**: réduction des nuisances associées au transport des matériaux – réduction des zones de dépôt des matériaux – préservation des matériaux naturels;
- **économique**: réduction des distances de transport et des coûts qui y sont liés;
- **technique**: les performances des sols traités sont excellentes, ce qui permet, dans certains cas, de diminuer l'épaisseur des couches à mettre en œuvre.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que cette technique nécessite des études plus poussées et une exécution plus soignée que lorsque l'on utilise des matériaux traditionnels.

II.2 Les différents agents de traitement

II.2.1 La chaux

Outre son utilisation pour le traitement des sols en construction routière, la chaux peut être utilisée dans de nombreux domaines: sidérurgie, verrerie, industrie papetière, agriculture, construction, etc. Aujourd'hui, les chaux utilisées en construction sont des produits normalisés (norme NBN EN 459 - 1, 2 et 3). Outre les paramètres repris dans la norme, des caractéristiques supplémentaires sont spécifiées dans les cahiers des charges types.

II.2.1.1 Fabrication

La chaux aérienne (ou chaux grasse) est obtenue par calcination de pierres calcaires très pures à haute température (± 950 °C):

$$CaCO_3 + \text{chaleur} \rightarrow CaO + CO_2$$

La chaux aérienne peut durcir lentement (recarbonatation) sous l'action du CO_2 atmosphérique (cette qualité de prise à l'air est à la base de la qualification de chaux aérienne).

II.2.1.2 Les différents types de chaux aériennes

La chaux aérienne peut exister sous les **trois formes** suivantes:

1. **Chaux vive**: elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %). Une chaux vive pour le traitement des sols est selon la norme NBN EN 459 à définir comme NBN EN 459-1 – CL90-Q;

2. **Chaux éteinte** (ou hydratée): elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique:

   $$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{chaleur (15,5 Kcal/mole CaO)}$$

   L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne une pulvérisation très fine du produit. Une chaux hydratée pour le traitement des sols est selon la norme NBN EN 459 à définir comme NBN EN 459-1 – CL90-S;

3. **Lait de chaux**: ce type de chaux est peu/pas utilisé en Belgique. Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher). En pratique, le lait de chaux ne fait pas l'objet d'une norme car ses caractéristiques, c'est-à-dire essentiellement sa concentration, sont déterminées par les besoins réels des matériaux au moment des travaux. On mesurera donc:

   - sa concentration (exprimée en extrait sec ES);
   - éventuellement la teneur en chaux libre.

La chaux vive contient à peu près 30 % de CaO disponible de plus que la chaux éteinte. Une tonne de chaux vive est équivalente à environ 1 300 kg de chaux éteinte. La chaux vive pèse entre 700 et 1 100 kg/m^3 alors que la chaux éteinte ne pèse que 560 kg/m^3.

II.2.1.3 Caractéristiques importantes des chaux aériennes

En ce qui concerne le traitement des sols à la chaux, **trois caractéristiques** de ce liant sont **importantes**:

1. La **teneur en CaO**. Le CaO peut être:
   - disponible: c'est-à-dire non combiné, sous forme de CaO pour la chaux vive et sous forme $Ca(OH)_2$ pour la chaux éteinte;
   - combiné: sous forme de carbonate (son importance est appréciée par la teneur en CO_2 de la chaux), de silicates et d'aluminates (la somme du CaO libre et du CaO combiné représente le CaO total). Sous forme combinée, le CaO n'est pas réactif et ne présente donc pas d'avantages pour le traitement.

2. La **finesse de mouture** (elle conditionne l'homogénéité du mélange sol-chaux, garantissant l'hydratation complète de la chaux). Elle intervient également dans les conditions de stockage et de transport.

3. La **réactivité** d'une chaux vive est évaluée par sa vitesse d'hydratation et le dégagement de chaleur provoqué par cette réaction chimique. Plusieurs facteurs influencent la réactivité d'une chaux vive, les principaux étant le mode de cuisson de la pierre calcaire originelle, sa pureté et le broyage de la chaux. L'essai est détaillé dans la norme NBN EN 459-2, § 5.10. La méthode de mesure normalisée consiste à suivre le dégagement de chaleur issu de l'addition de 150 grammes de chaux vive à 600 grammes d'eau préalablement portée à une température de 20 °C, et ce dans un récipient isotherme. Le temps mis par le mélange pour atteindre une température de 60 °C est appelé le t60 et est exprimé en minutes. Plus la chaux est réactive, plus ce délai est court. Il est à noter que cette valeur n'exempte pas de réaliser la détermination des caractéristiques granulométriques et de la teneur en CaO disponibles.

Globalement, pour assurer un traitement du sol satisfaisant, les caractéristiques de la chaux sont les suivantes:

	CaO disponible	Finesse de mouture / Granularité	Vitesse d'hydratation
Chaux vive CL90-Q	≥ 88 % (RW99)	Refus au tamis de 2 mm < 5 % avec refus au tamis de 0,063 mm < 70 % (CCT 2010, RW99, SB 250)	60 °C en moins de 8 min (RW99)
Chaux éteinte CL90-S	> 60 % (teneur en $Ca(OH)_2$ ≥ 90 % (RW99)	Refus au tamis de 0,063 mm < 15 % (CCT 2010, RW99, SB 250)	/

Tableau 2 *Caractéristiques requises de la chaux pour assurer un traitement de sol satisfaisant*

II.2.1.4 Action de la chaux aérienne

La chaux aérienne incorporée à un sol cohésif humide s'engage dans **deux réactions distinctes** avec les minéraux argileux:

- une **réaction rapide** responsable des effets immédiats de la chaux (**amélioration des sols** à la chaux);
- une **réaction lente** conduisant à un durcissement progressif du mélange sol-chaux compacté et conduisant aux effets à long terme (**stabilisation**). La vitesse de réaction dépend directement de la température.

II.2.1.5 Choix du type de chaux

Pour le traitement des sols, toutes les chaux pulvérulentes, qu'elles soient vives ou éteintes conviennent. Toutefois, s'il est nécessaire d'assécher le sol pour se rapprocher des conditions optimales de réemploi, le choix de l'utilisateur s'orientera vers la chaux vive qui permet de diminuer la teneur en eau du sol.

Si l'on travaille dans des zones «sensibles», l'utilisateur s'orientera vers la chaux à émission de poussière réduite ou le lait de chaux) et/ou adaptera les méthodes de travail (cf. chapitre III.9.4 *Chantiers «sensibles»*).

II.2.2 Le ciment

II.2.2.1 Définition

Le ciment est un **liant hydraulique**, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange.

II.2.2.2 Constituants

Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des constituants principaux et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium.

La norme européenne NBN EN 197-1 relative au ciment définit les constituants suivants:

- **Constituants principaux** (> 95 % de la somme des constituants principaux et secondaires):
  - Clinker Portland (K);
  - Laitier granulé de haut-fourneau (S);
  - Matériaux pouzzolaniques:
    - Pouzzolane naturelle (P);
    - Pouzzolane naturelle calcinée (Q);
  - Cendres volantes:
    - Cendre volante siliceuse (V);
    - Cendre volante calcique (W);
  - Schiste calciné (T);
  - Calcaire (L - LL);
  - Fumée de silice (D);
- **Constituants secondaires** (< 5 % de la somme des constituants principaux et secondaires);
- **Additifs** (< 1 % de la somme des constituants principaux et secondaires);
- **Sulfate de calcium** (l'addition de cette matière a pour objet de réguler le temps de prise du ciment dans certaines limites).

II.2.2.3 Production du ciment

La fabrication proprement dite du ciment consiste à doser et à moudre finement les différents constituants dans des proportions bien déterminées. En broyant le clinker Portland avec un régulateur de temps de prise et les éventuels constituants complémentaires, en fonction du type de ciment à fabriquer, on obtient un mélange homogène et intime des constituants. La finesse finale de mouture est fixée en fonction de la réactivité et de la classe de résistance souhaitées.

II.2.2.4 Différents types de ciments, composition, désignation normalisés

On distingue **cinq types de ciments courants**:

- CEM I Ciment Portland;
- CEM II Ciment Portland composé;
- CEM III Ciment de haut-fourneau;
- CEM IV Ciment pouzzolanique;
- CEM V Ciment composé.

Les ciments selon la norme NBN EN 197-1 doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désigne la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou R.

On distingue les **ciments spéciaux** suivants:

- **Ciment à faible teneur en alcalis**: ce type de ciment est doté de la désignation LA derrière la désignation courante selon la norme NBN EN 197-1. Un ciment LA doit être conforme à la norme NBN B12-109;
- **Ciment à haute résistance aux sulfates**: ce type de ciment est doté de la désignation HSR derrière la désignation courante selon la norme NBN EN 197-1. Un ciment HSR doit être conforme à la norme NBN B12-108;
- **Ciment à faible chaleur d'hydratation**: désigné par LH et conforme à la norme NBN EN 197-1/A1 (2004). La chaleur d'hydratation des ciments courants à faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 J/g, déterminée après 7 jours selon la méthode par dissolution (méthode d'essai reprise dans la norme NBN EN 196-8) ou déterminée après 41 heures selon la méthode semi-adiabatique (méthode d'essai reprise dans la norme NBN EN 196-9);
- **Ciment Portland à résistance initiale élevée**: ce type de ciment est doté de la désignation HES derrière la désignation courante selon la norme NBN EN 197-1. Un ciment HES doit correspondre à la norme NBN B12-110.

II.2.2.5 Choix du ciment pour le traitement de sol

Dans la gamme étendue disponible, le choix du type de ciment se fera sur différents **critères**:
- temps de prise assez long, pour la mise en œuvre;
- bonne résistance à moyen et long terme;
- compatibilité avec le sol à traiter;
- bon rapport qualité/prix.

En principe, toutes les classes de ciments peuvent convenir pour le traitement des sols. Les ciments les plus couramment utilisés dans ce domaine, sont les ciments de haut-fourneau (CEM III) de classe de résistance 32,5 N ou 42,5 N. Les ciments à prise rapide (CEM I) ne sont pas recommandés.

II.2.3 Liants hydrauliques routiers

II.2.3.1 Description

Les liants hydrauliques routiers sont produits en usine et distribués prêts à l'emploi. Leurs propriétés sont spécifiquement adaptées pour le traitement des sols (ou des granulats). L'usage des LHR en traitement de sol concerne l'amélioration et la stabilisation, selon l'application visée. Le type de LHR et le dosage devront être choisis en fonction de la nature du sol et de l'objectif de traitement. Un liant hydraulique routier, mélangé à l'eau, durcit aussi bien à l'air que sous eau et reste solide même sous eau.

Un liant hydraulique routier se présente sous forme d'une poudre obtenue en mélangeant différents constituants. Leur composition est statistiquement homogène.

Pour produire des liants hydrauliques routiers, il est essentiel de disposer des installations et du personnel qualifié nécessaires pour contrôler et évaluer la qualité des produits et procéder aux ajustements nécessaires. Le procédé de fabrication et son contrôle doivent garantir que la composition des liants hydrauliques routiers respecte les exigences décrites dans le document normatif de référence, soit prEN 13282[(9)]. Cette future norme européenne prEN 13282 sera la référence du futur marquage CE des liants hydrauliques routiers. Elle devrait être d'application en 2012. Cette nouvelle norme sera articulée en trois parties tout en conservant l'ensemble de la philosophie essentiellement basée sur la déclaration de composition par le producteur. Les trois parties de la norme sont:

- prEN 13282-1 (2009) *Liants hydrauliques routiers – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement rapide*;
- prEN 13282-2 (2009) *Liants hydrauliques routiers – Partie 2: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement normal*;
- prEN 13282-3 (2009) *Liants hydrauliques routiers – Partie 3: Evaluation de la conformité*.

Les liants hydrauliques routiers à durcissement rapide résultent de l'expérience allemande, tandis que les liants hydrauliques routiers à durcissement normal résultent de l'expérience française (réf. 47).

La définition technique du liant hydraulique routier repose sur la désignation normalisée comprenant (figure 23, page 39):

- une déclaration de composition relative au type de liant hydraulique routier (durcissement normal ou rapide);
- une définition liée à la classification mécanique (R_c mortier selon NBN EN 196-1);
- l'origine du liant hydraulique routier éventuellement complétée par l'appellation commerciale.

Une fiche technique devra décrire complètement le liant hydraulique routier pour l'ensemble des paramètres normalisés (composition, exigences mécaniques, exigences physiques, exigences chimiques).

Le producteur pourra également inclure dans cette fiche technique des éléments qu'il jugera pertinents pour aider à l'emploi du liant hydraulique routier (choix, optimisation du dosage à employer en fonction de l'objectif performantiel à atteindre, etc.).

[9] *Ces projets de normes sont disponibles au Bureau de Normalisation (NBN).*

II.2.3.2 Spécifications

II.2.3.2.a Composition et désignation

La composition normalisée des LHR est résumée ci-après. Il est néanmoins recommandé à l'utilisateur de consulter les normes concernées pour les compositions exactes (prEN 13282-1 et prEN 13282-2).

a. Constituants principaux

- les constituants désignés par la NBN EN 197-1 soit:
  - le clinker Portland (K);
  - le laitier granulé de haut-fourneau (S);
  - les pouzzolanes naturelles (P) ou artificielles (calcinées) (Q);
  - les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) en acceptant une limite de perte au feu pouvant atteindre 10 %;
  - les schistes calcinés (T);
  - le calcaire (L,LL).
- la chaux calcique (CL) ou chaux hydraulique naturelle (NHL) conformes NBN EN 459-1. CL peut être soit de la chaux vive (CL-Q), soit de la chaux hydratée (CL-S).
- Pour les LHR à durcissement normal (prEN 13282-2): cendres volantes:
  - les cendres volantes siliceuses (Va);
  - les cendres volantes calciques non éteintes (Wa).

b. Constituants secondaires

Il est possible d'ajouter des constituants secondaires dans une proportion n'excédant pas 10 % en masse (voir prEN 13282-1 et prEN 13282-2). Ils sont constitués de minéraux naturels organiques ou inorganiques issus des procédés de fabrication du clinker ou issus de la liste des constituants principaux.

c. Sulfates de calcium

d. Additifs

La quantité d' additifs n'excède pas 1 % en masse de la composition. Ils ont pour but d'améliorer les propriétés du LHR.

II.2.3.2.b Déclaration de composition

La désignation normalisée des LHR implique une déclaration obligatoire de composition qui comprend les proportions moyennes des constituants principaux (prEN 13282-1 et prEN 13282-2), ainsi que le sulfate de calcium, si la teneur en sulfates est supérieure à 4 % (prEN 13282-2).

La désignation normalisée indiquera également une classe de résistance mécanique.

a. Exigences physiques

Les exigences physiques concernent le temps de début de prise (NBN EN 196-3, §6) et la stabilité (expansion) (NBN EN 196-3, §7). Les exigences sont données dans les normes prEN 13282-1 et prEN 13282-2.

b. Exigences chimiques

Les exigences chimiques concernent la teneur en sulfates (NBN EN 196-2).

c. Exigences mécaniques

La résistance à la compression des liants hydrauliques routiers doit être déterminée conformément à la norme NBN EN 196-1 en remplaçant le ciment par le liant hydraulique routier.

La désignation aura la forme suivante: HBR accompagné de la classe de résistance en MPa (essais à 7, 28 pour les LHR à durcissement rapide ou à 56 jours pour les LHR à durcissement normal).

II.2.3.3 Action du LHR

Par un dosage relativement faible de liant hydraulique routier, on obtient déjà:

- un changement de la limite de plasticité;
- une modification de la courbe Proctor.

L'utilisation d'un liant hydraulique routier contenant de la chaux vive a aussi les conséquences suivantes:

- fixation chimique de l'eau + évaporation;
- augmentation de la quantité de matière sèche;
- effet de malaxage et aération.

La partie hydraulique complète la modification de la structure du sol en liant des fines dans le sol et en apportant une augmentation de la portance (CBR ou IPI) du sol compacté. Ainsi, les propriétés du sol amélioré évoluent encore d'une façon importante dans les 24 h suivant le traitement et continuent à évoluer durant les jours et semaines qui suivent le traitement.

II.2.3.4 Choix du type de LHR

Le choix du type de LHR (type clinker, type laitier ou type mixte, avec ou sans chaux) dépend du type de sol, de la teneur en eau, de la température et l'objectif de traitement (amélioration ou stabilisation).

II.3 Traitement des sols

Dans le cadre des techniques de modifications des matériaux, il faut faire la distinction entre **trois termes** (réf. 10, 18, 26):

- **Traitement** = terme général pour désigner un procédé consistant à modifier un matériau donné afin qu'il puisse remplir les fonctions auxquelles on le destine.
- **Amélioration** = opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol (augmentation de la portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement. Ce traitement ne donne pas une garantie de durabilité vis-à-vis de l'eau et du gel.
- **Stabilisation** = opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol, de manière à conférer durablement au matériau un état définitif de stabilité à l'eau et au gel. Elle se traduit, entre autres par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. Ces effets pourraient être mis à profit dans le dimensionnement de certaines chaussées, mais n'interviennent pas au niveau des travaux de terrassement.

II.3.1 Amélioration des sols

L'amélioration permet le réemploi en **remblai**, **fond de coffre**, **support de radier de bâtiment industriel** de sols fins trop peu portants (comme les sols sensibles à l'eau et trop humides). Elle permet de conférer au sol une portance immédiate et d'assurer par un degré de compactage satisfaisant, sa mise en œuvre correcte (aptitude à supporter le trafic de chantier et à obtenir les performances visées au compactage). On considère que lorsque l'IPI est inférieur à 5 (pour les sols argileux), 10 (pour les sols limoneux) ou 15 (pour les sols sableux), la circulation des engins de chantier devient très difficile et que la réutilisation du sol sans amélioration est délicate voire impossible.

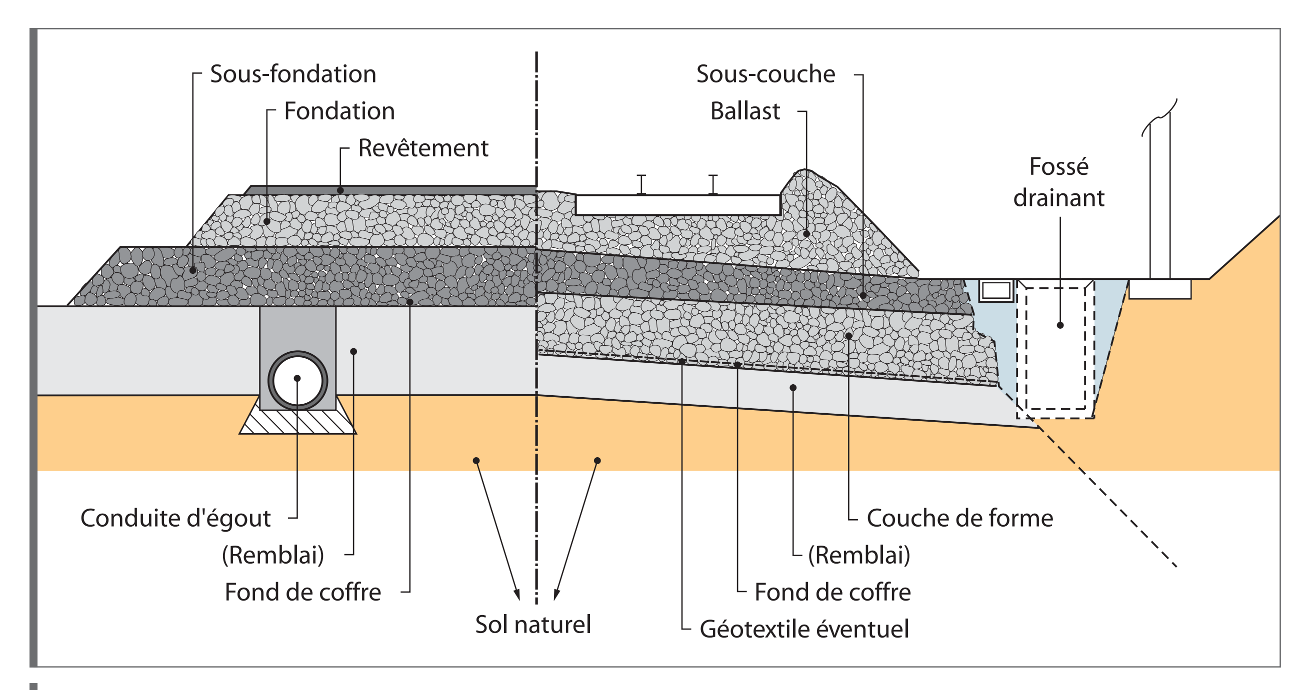


Figure 18 Schéma de structure de chaussée (et voie ferrée)

II.3.1.1 Amélioration à la chaux (réf. 31, 33, 36)

II.3.1.1.a Principe

L'incorporation de chaux dans un sol argileux a deux effets immédiats sur le comportement de ce sol:

- une **modification de la structure** du sol (chaux vive, éteinte ou lait de chaux) se traduisant par la formation de grumeaux stables (granulation, floculation);
- un **assèchement des sols humides** (chaux vive).

Un sol est considéré comme apte à l'amélioration si l'effet requis à court terme (en quelques heures) peut être obtenu au moyen d'une dose de chaux économiquement admissible.

II.3.1.1.b Effets

Les effets du traitement à la chaux sur le sol détaillés ci-après sont les effets observés pour des sols réagissant bien avec la chaux.

1. Modification de la structure du sol (réf. 11, 18, 26, 30)

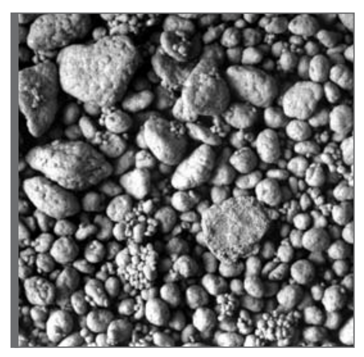
L'incorporation de chaux (vive ou éteinte) à un sol limoneux ou argileux humide provoque immédiatement l'agglomération des fines particules argileuses en grumeaux stables. Ce phénomène, appelé granulation ou floculation, s'explique par la formation de ponts $Ca(OH)_2$ ou $CaOH^+$ entre les feuillets d'argile.

Les grumeaux sol-chaux ont un aspect plus sableux que les grumeaux du sol non traité. Ils sont plus petits, non collants, de teinte plus claire, plus secs en apparence.

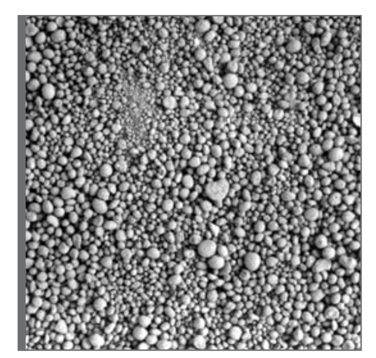
Granulation (en laboratoire):
La stabilité des grumeaux sol-chaux est double:
- stabilité mécanique se traduisant par une résistance à l'écrasement plus élevée;
- stabilité en présence d'eau libre.

La formation de grumeaux stables est à l'origine de plusieurs améliorations quasi instantanées des caractéristiques géotechniques du sol[10]:

[10] *Pour la description de ces caractéristiques et des essais permettant de les déterminer, nous vous renvoyons au chapitre I.3* Essais *(I.3.1.2* Indice de plasticité *et I.3.3.1* Portance /compacité*)*



Avant traitement: grumeaux non stables d'un sol non traité



Après traitement: grumeaux stables du même sol traité avec 1 % de chaux

Figure 19 Granulation (en laboratoire)

- La **limite de plasticité (w_P) est augmentée** (de 0,5 à 6 %), ce qui se traduit par une diminution de l'indice de plasticité Ip, la limite de liquidité variant dans des proportions nettement moins importantes (cf. figure 20). L'augmentation de la limite de plasticité est, dans l'ensemble, d'autant plus marquée que l'indice de plasticité du sol naturel est plus élevé. Après traitement, le sol se trouve à une teneur en eau inférieure à la nouvelle limite de plasticité, c'est-à-dire dans la zone de conditions permettant la circulation des engins. L'augmentation de la limite de plasticité est déjà acquise au bout de quelques minutes après l'addition de chaux, elle reste à peu près inchangée pendant une heure ou deux et s'atténue lentement par la suite en raison de l'apparition graduelle des effets de la réaction chimique lente des minéraux argileux avec le sol.

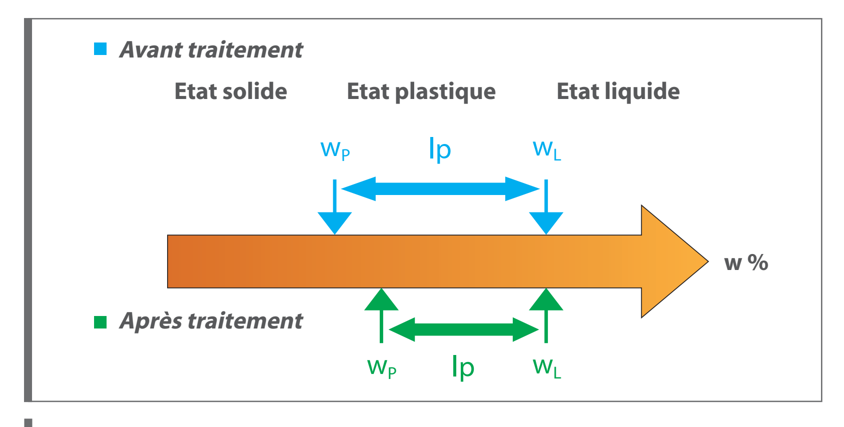


Figure 20 Effet de l'amélioration à la chaux sur la plasticité d'un sol

- La **courbe Proctor est modifiée**:
  - forme plus aplatie;
  - compacité maximale moindre ($\rho_{d\ max}$);
  - teneur en eau optimale (w_{OPN}) plus élevée (1,5 à 4 %).

  Comme le montre la forme aplatie de la courbe Proctor, la compacité relative ($\rho_d/\rho_{d\ max}$) est beaucoup plus élevée dans le cas du mélange sol-chaux. De plus, le mélange sol-chaux est toujours plus sec que le sol naturel. L'augmentation de la compacité relative et l'assèchement du mélange sol traité expliquent pourquoi le traitement à la chaux vive permet d'améliorer l'aptitude au compactage du sol.

- Le **déplacement de la courbe des indices CBR ou IPI vers les teneurs en eau plus élevées.** A compacité égale et à teneur en eau égale, l'indice CBR du mélange sol-chaux est, à l'âge de deux heures, 6 à 10 fois plus grand que celui du sol non traité. Le gain en indice CBR est en réalité beaucoup plus élevé puisque le mélange sol-chaux est toujours plus sec que le sol naturel (le gain en indice CBR peut ainsi atteindre, dans certains cas, un facteur de l'ordre de 50 par rapport à l'indice CBR du sol non traité avec son humidité naturelle[11] (réf. 26).

[11] *Ces valeurs sont calculées à partir d'essais CBR réalisés sur des éprouvettes compactées à l'énergie Proctor modifié.*

Le maintien dans le temps de la portance vis-à-vis de l'humidité ultérieure au compactage (pour un sol qui n'est pas soumis au gel) peut être traduit par le rapport entre l'indice CBR après 4 jours d'immersion et l'IPI. On considère que la portance se maintient dans le temps si ce rapport est ≥ 1.

La modification de structure du sol dépend de la présence et de la nature des minéraux argileux. Pour être améliorable à la chaux, le sol doit avoir un indice de plasticité Ip mesurable ou ≥ 5.

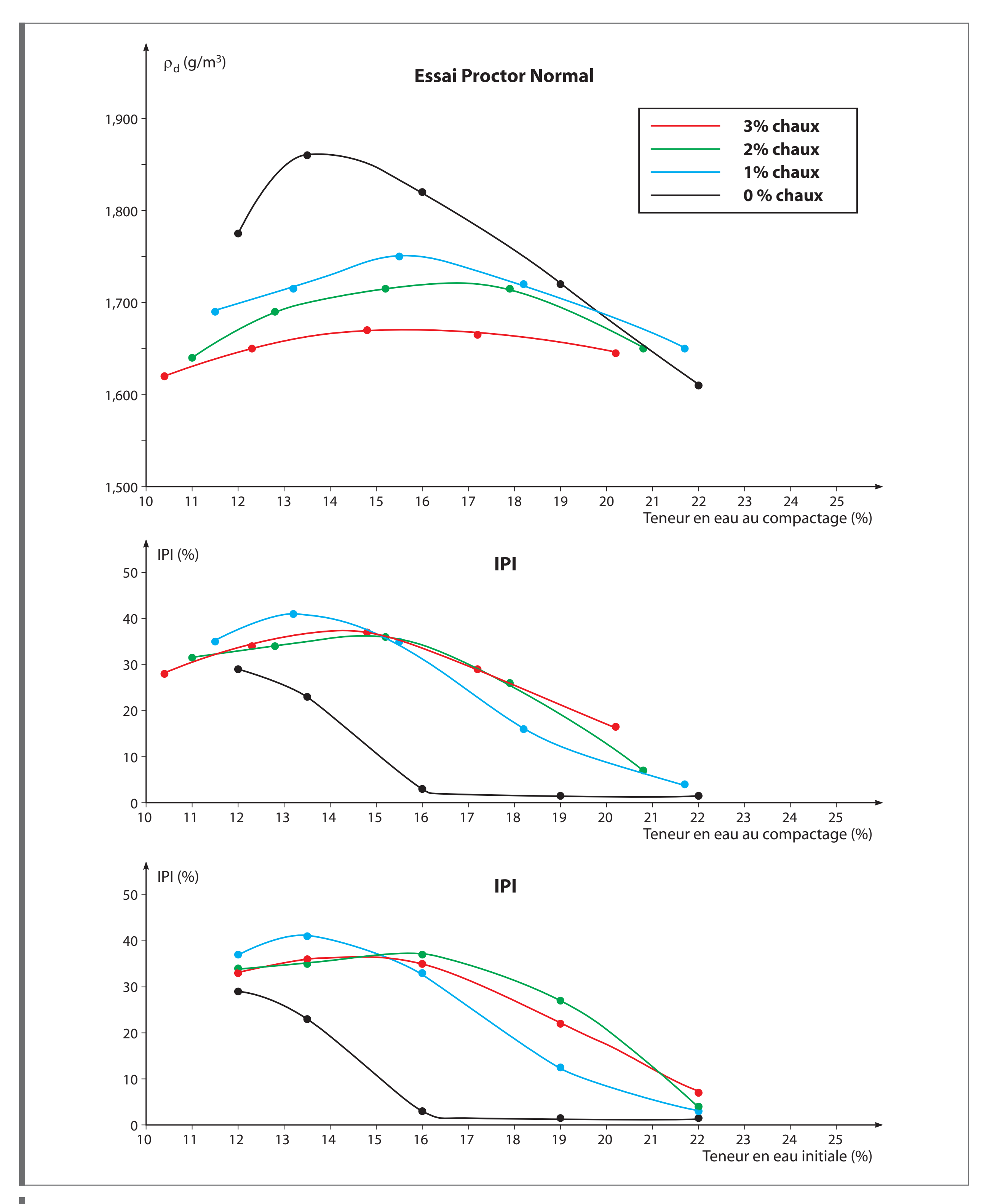


Figure 21 Influence de différents dosages en chaux (0, 1, 2 et 3 %) sur les caractéristiques de compactage (courbes Proctor) et sur la portance du sol (courbes IPI)

Une faible dose de chaux vive ou éteinte (de l'ordre de 0,5 % au laboratoire et 1 % en pratique pour des raisons d'homogénéité du mélange) suffit généralement pour provoquer ces améliorations, sous réserve d'un bon malaxage et d'absence d'inhibiteurs. Des doses de chaux plus fortes n'accentuent que légèrement ces effets immédiats.

Nous attirons ici l'attention du lecteur sur le fait que «teneur en eau au compactage» et «teneur en eau initiale» sont deux valeurs différentes. En effet, la teneur en eau au compactage est la teneur en eau du matériau après addition de l'agent de traitement alors que la teneur initiale est la teneur en eau du matériau à l'état naturel.

2. Assèchement du sol (réf. 25)

Un autre effet du traitement à la chaux est une réduction de la teneur en eau. Cet assèchement résulte de quatre phénomènes différents:

Diminution de la teneur en eau due à la chaux (dépend uniquement de la quantité de chaux ajoutée)

1) Fixation chimique d'eau d'hydratation par l'oxyde de calcium (**chaux vive**): l'oxyde de calcium se lie chimiquement à l'eau du sol pour se transformer en hydroxyde de calcium: $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$. 1g de CaO libre contenu dans la chaux fixe chimiquement 0,321 g d'eau, une chaux vive titrant 92 à 93 % de CaO libre fixe donc environ 30 % de son poids en eau d'hydratation (réf. 26).
2) Evaporation par la chaleur d'hydratation de l'oxyde de calcium (**chaux vive**): la réaction d'extinction de la chaux est exothermique. Une partie de la chaleur dégagée élève la température du mélange, le reste provoque une évaporation de l'eau du sol. (quantité d'eau évaporée grâce à la chaleur d'hydratation ± 0,15 g d'eau par g de CaO incorporé au sol) (réf. 31). La répartition de la chaleur d'hydratation entre l'échauffement du mélange d'une part et l'évaporation d'autre part dépend de la vitesse d'hydratation de la chaux ainsi que des échanges de chaleur entre le mélange et son environnement.
3) Augmentation de la quantité de matière sèche (**chaux vive ou éteinte**): on observe une réduction de teneur en eau du fait que la matière sèche présente est augmentée du poids de la chaux éteinte formée, soit environ 1,3 fois le poids de chaux vive ajoutée (réf. 10).

Diminution de la teneur en eau due aux facteurs extérieurs

4) Action des facteurs extérieurs sur chantier (**malaxage et aération**): une évaporation notable d'eau se produit lors du malaxage et au cours de l'exposition du mélange pulvérisé à l'air avant le compactage. Cette évaporation se produit également en l'absence de chaux. Les agents atmosphériques produisent, lorsqu'ils sont favorables (soleil, vent) une évaporation d'eau pouvant se chiffrer à une perte d'eau de 2,5 % en deux heures, ce qui est bien plus que ce que peut produire une dose économique de chaux (la réduction de teneur en eau produite par la chaux vive peut atteindre 0,65 % d'eau par 1 % de chaux vive de bonne qualité) (réf. 10). Par temps brumeux et froid, cette évaporation par les facteurs extérieurs est moindre, et elle devient nulle lorsque l'air est saturé en humidité. L'effet des facteurs climatiques se fait surtout sentir dans les 5 cm supérieurs de la couche meuble de mélange sol-chaux non compacté.

II.3.1.1.c Avantages de l'amélioration à la chaux

Par son effet combiné d'assèchement des sols humides (par fixation chimique, développement de chaleur, malaxage et ajout de matière sèche) et de granulation des sols plastiques, la chaux procure aux sols traités les avantages suivants:

- facilité de manipulation des sols et amélioration des possibilités de compactage;
- amélioration de la portance directe et facilité accrue de circulation sur le chantier se traduisant par une accélération des travaux de terrassement.

Pour les sols réagissant bien à la chaux ($CBR_{4\ jours\ d'immersion}$ /IPI > 1 ou, en général, les sols limoneux et argileux), le mélange sol – chaux maintient et/ou développe sa portance et ses autres caractéristiques géotechniques à court terme (quelques jours) et à moyen terme (mois/années).

II.3.1.1.d Type de sol

Sols argileux et limoneux.

II.3.1.1.e Quantité de chaux à épandre

Le dosage en chaux, qui dépend du sol à traiter, varie entre une limite technologique de l'ordre de 0,5 % (limite permettant une répartition homogène de l'agent de traitement) et une limite économique (liée au prix unitaire de la chaux et aux conditions socio-économiques locales), de l'ordre de 3 à 4 % de chaux vive (réf. 27, 31).

Précaution

- Si des doses élevées sont utilisées pour l'amélioration immédiate, le sol traité peut durcir graduellement. Cela peut être intéressant pour le développement de performances mais également être moins souhaitable ultérieurement (le creusement de tranchées de pertuis d'égouts, de tuyaux, de câbles, etc. devient de plus en plus difficile au cours du temps).

II.3.1.2 Amélioration aux liants hydrauliques routiers

Pour les sols d'argilosité faible à moyenne (Ip < 25), ces liants hydrauliques routiers constituent une alternative à la chaux, en particulier s'ils contiennent une fraction importante de chaux libre (15 à 30 %) aussi réactive que celle présente dans la chaux vive classique (réf. 48). Ce type de sol contenant une faible quantité d'éléments argileux, il ne faut ajouter qu'une faible quantité de chaux vive afin de compenser l'effet plastique de l'argile dans le sol.

Les dosages sont généralement équivalents à ceux utilisés pour la chaux vive (1 à 3 %) tout en garantissant une absence de raidissement.

Dans le cas de sol très faiblement argileux (Ip < 12), et en particulier dans le cas de sables homométriques, un traitement au liant hydraulique routier permet de structurer le sol tout en laissant un délai d'ouvrabilité maximum à l'entreprise.

Il existe des liants hydrauliques routiers à prise rapide (LHR PR), commercialisés notamment en France. Il s'agit de LHR composés de plus de 95 % de clinker. Ils sont utilisés pour l'amélioration de sols peu argileux ou sableux trop humides. Ce type de liant confère au sol une certaine rigidité, ce qui permet d'obtenir une portance et traficabilité correctes.

Cependant, l'action des LHR, y compris les LHR à prise rapide, n'est pas aussi rapide que celle de la chaux. Il faut attendre que le liant fasse 'prise' pour observer une amélioration des caractéristiques du matériau traité.

II.3.1.3 Amélioration au ciment

Pour des sols peu ou pas argileux, l'utilisation de ciment peut être envisagée. Néanmoins, l'utilisation de ciment en amélioration reste marginale.

II.3.2 Stabilisation des sols

Les avantages de la stabilisation sont les suivants:

- augmentation de la **portance** du matériau et maintien de celle-ci dans le temps;
- obtention de la **résistance à l'eau et au gel**.
  - la sensibilité à l'immersion d'un matériau peut être évaluée par des essais de résistance. Les paramètres habituellement utilisés pour évaluer la tenue à l'eau sont la résistance à la compression à 28 jours de cure normale + 32 jours d'immersion dans de l'eau à 20 °C (R_{ci}) et la résistance à la compression à 60 jours de cure normale (R_{c60})[12]. On considère que la résistance à l'immersion est obtenue lorsque le rapport: R_{ci}/R_{c60} est ≥ 0,80 (ou lorsque R_{ci}/R_{c60} est ≥ 0,60 si la MB est > 6) (réf. 8).

12 *Une description de ces caractéristiques et des essais à réaliser pour les déterminer est donnée au chapitre I.3* Essais *(I.3.3.2* Résistance à la traction indirecte *et I.3.3.3* Résistance à la compression simple*).*

- un sol sensible au gel est un sol pour lequel le gel et le dégel occasionnent des déformations du matériau: soulèvement en période de gel, chute de portance en période de dégel. S'il y a un risque de pénétration du gel dans la couche traitée, une étude du comportement au gel du matériau traité doit être réalisée pour vérifier la tenue au gel du matériau traité. La résistance au gel est évaluée par des essais de résistance. Les paramètres habituellement utilisés pour évaluer la tenue au gel sont la résistance à la traction indirecte (R_{it}), la résistance à la compression simple (R_c)[12]. Les valeurs de résistance à obtenir varient selon le type de matériau et les conditions climatiques auxquelles il sera soumis. On considère cependant que la résistance au gel est atteinte si la R_{it} du sol traité est ≥ 0,25 MPa (ou si la R_c du sol traité est ≥ 2,5 MPa), à l'âge correspondant à la date d'apparition présumée du gel sur chantier (réf. 8).

La stabilisation présente un intérêt du point de vue du dimensionnement en raison de la fonction structurelle qu'elle permet de conférer à la couche de sol stabilisé. Elle permet de réaliser économiquement des **sous-fondations**, des **fondations de voiries à faible trafic** (chemins ruraux, voiries de lotissements, aires de parking, etc.) ainsi que des **couches support de fondation pour plates-formes industrielles**.

Le traitement permet à la couche stabilisée de remplir les fonctions suivantes:

- distribution des charges: durant la construction (circulation des engins de chantier, exécution des travaux) et après la construction (contraintes exercées sur la chaussée);
- protection du sol support contre l'eau et le gel pour assurer la pérennité de la construction dans le temps).

La stabilisation peut être réalisée grâce à l'ajout:

- de ciment;
- de chaux;
- de LHR;
- d'un mélange chaux-liant hydraulique.

II.3.2.1 Stabilisation au ciment ou au liant hydraulique routier (sans chaux vive en constituant principal) (réf. 17, 19, 22, 23)

II.3.2.1.a Principe

Le liant hydraulique (ciment ou liant hydraulique routier) incorporé au sol va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivie par une phase de prise. En s'hydratant, les constituants du liant hydraulique enrobent et relient les grains entre eux: c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement et durablement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau et au gel. Ce traitement assure l'augmentation de la portance.

La vitesse et le taux d'hydratation dépendent principalement:

- des constituants du liant hydraulique et de leur finesse;
- de la présence de certaines substances (inhibition par les matières organiques);
- de la teneur en eau;
- de la température (toutefois, la prise hydraulique est nettement moins sensible à la température que les réactions pouzzolaniques dans la mesure où celle-ci reste supérieure à 0 °C).



Figure 22 *Stabilisation au ciment*

II.3.2.1.b Type de sol

Sols peu/pas argileux.

II.3.2.2 Stabilisation à la chaux (réf. 15, 18, 29, 30, 32, 35, 38)

II.3.2.2.a Principe

La chaux élève le pH du sol et favorise la mise en solution de l'alumine et de la silice contenues dans les argiles. Il se forme alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés qui, en cristallisant, lient graduellement les grains du sol entre eux. Cette réaction, dite pouzzolanique, induit une augmentation des propriétés mécaniques du mélange sol-chaux (augmentation de la portance, de l'indice CBR et de la résistance à la compression simple). L'évolution de ces propriétés mécaniques rend le sol stabilisé peu sensible à la teneur en eau et au gel. Un sol réagissant bien à la chaux développera à terme des caractéristiques durables.

Dans nos régions, cette stabilisation se développe de façon continue pendant une période variant entre quelques mois et plusieurs années.

La durée de cette réaction à long terme est fortement influencée par:

- la nature de l'argile;
- la température ambiante: à 40 °C, la vitesse de réaction est de 10 à 20 fois plus rapide qu'à 20 °C. En dessous de 4 °C, la réaction est arrêtée temporairement. Au-delà de 40 °C, la nature de la réaction entre les minéraux argileux et la chaux est modifiée;
- la présence de certaines substances (cf. chapitre I.3.1.5 *Détermination de la teneur en matières organiques et autres constituants chimiques particuliers*);
- la dose de chaux.

Le comportement au gel d'un sol traité à la chaux est fonction de la nature du sol, du délai après traitement, et du dosage.

A partir d'un certain âge (quelques mois), pour des dosages suffisants en chaux, le mélange sol-chaux résiste mieux aux effets de cycles gel/dégel que le sol naturel. Il est donc nécessaire de réaliser le traitement quelques mois avant l'apparition du gel (au printemps ou en été).

II.3.2.2.b Type de sol

Sols moyennement à fortement argileux (Ip > 20).

II.3.2.3 Stabilisation chaux-ciment ou chaux-liant hydraulique routier (sans chaux vive en constituant principal) ou au liant hydraulique routier (avec de la chaux vive comme constituant principal)

II.3.2.3.a Principe

Le traitement mixte consiste en l'utilisation de deux agents de traitement complémentaires:

- un traitement préalable à la chaux qui flocule les argiles et assèche les matériaux humides, ce qui facilite l'incorporation du liant hydraulique dans des conditions idéales garantissant une bonne homogénéité du mélange;
- un traitement au liant hydraulique qui apporte une rigidification rapide.

Les caractéristiques des sols stabilisés par un traitement mixte dépendent:

- de la nature du sol;
- de la teneur en eau du sol;
- de la présence de certaines substances (cf. chapitre I.3.1.5. *Détermination de la teneur en matières organiques et autres constituants chimiques particuliers*);
- des quantités de chaux et de liant hydraulique utilisées.

Le délai entre traitement à la chaux et traitement au liant hydraulique dépend de l'organisation du chantier. En tout état de cause, la réactivité et la finesse de la chaux vive routière normalisée sont telles qu'on peut enchaîner deux traitements dans la même journée (en respectant une finition intermédiaire). La référence 49 décrit le traitement mixte d'une sous-fondation (prétraitement à la la chaux suivi d'un traitement au LHR). Le sol traité a présenté des capacités portantes beaucoup plus élevées que les exigences requises, ainsi qu'une résistance à l'eau et au gel très satisfaisante.

On peut également utiliser des liants hydrauliques routiers contenant de la chaux vive comme constituant principal. Cette technique permet d'éviter le double traitement (d'abord chaux, puis liant hydraulique routier) si la qualité de mouture est suffisante après cette seule phase d'épandage/malaxage.

Une étude de formulation complète est néanmoins fortement recommandée pour définir le type de LHR et le dosage requis.

II.3.2.3.b Avantages ***du double traitement***

Le prétraitement à la chaux permet:

- de faciliter la manutention du sol;
- d'améliorer les conditions de circulation des engins de chantier (notamment pour l'épandage homogène des liants hydrauliques);
- de réduire la plasticité du sol, ce qui permet de favoriser le malaxage avec le liant hydraulique et d'atteindre la finesse de mouture satisfaisante pour assurer l'homogénéité du mélange final;
- de préserver l'efficacité du liant hydraulique;
- de maîtriser l'humidité du sol.

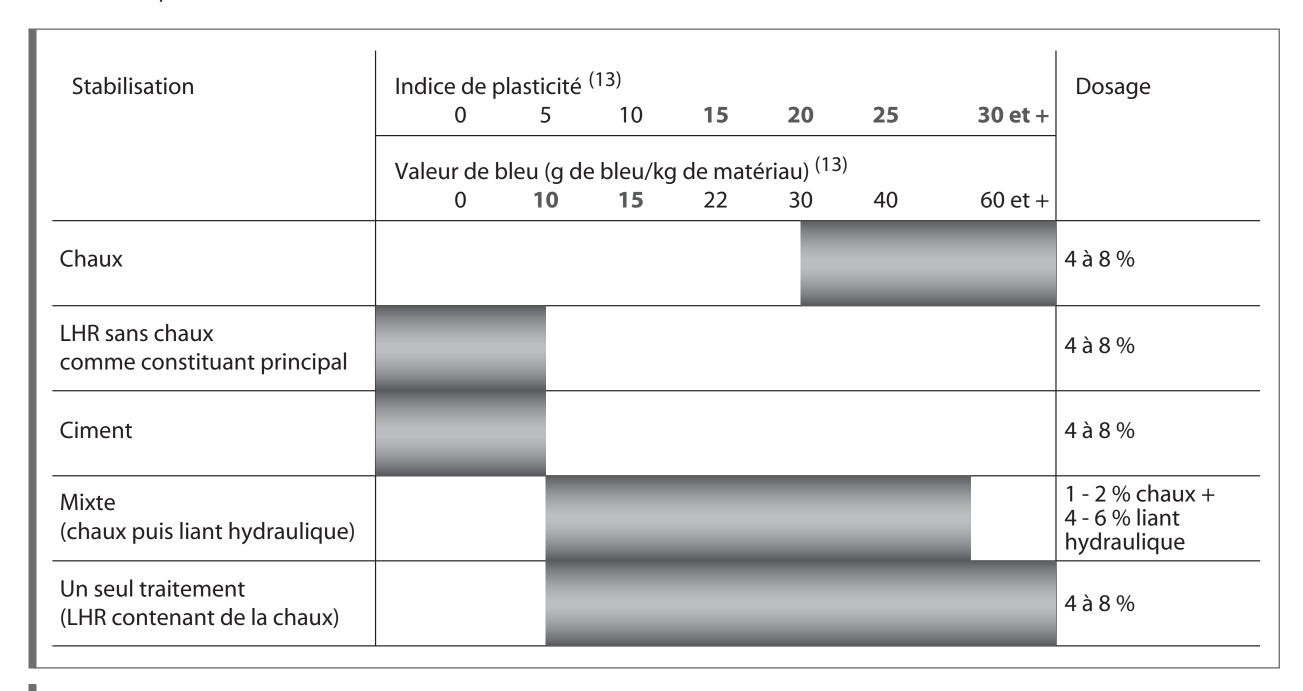
Avantages du traitement avec des liants hydrauliques routiers (contenant de la chaux vive comme constituant principal):

- un seul produit sur le chantier;
- facilités de logistique et de stockage;
- réduction du nombre d'opérations à effectuer (épandage, malaxage) et pas de période d'attente (entre le traitement à la chaux et le traitement au liant hydraulique);
- performances proches de celles obtenues avec un traitement séparé chaux-ciment ou chaux-liant hydraulique routier (sans chaux vive comme constituant principal);
- très adapté aux chantiers de petite et moyenne taille.

II.3.2.3.c Type de sol

- **Traitement mixte (double traitement)**: sols peu à moyennement argileux (sols limoneux, sables limoneux et sables limoneux/argileux).
- **Traitement mixte (traitement unique)**: sols peu à moyennement argileux.

II.3.2.4 Synthèse



Stabilisation	Indice de plasticité (13) 0 5 10 **15** **20** **25** **30 et +** Valeur de bleu (g de bleu/kg de matériau) (13) 0 **10** **15** 22 30 40 60 et +	Dosage
Chaux		4 à 8 %
LHR sans chaux comme constituant principal		4 à 8 %
Ciment		4 à 8 %
Mixte (chaux puis liant hydraulique)		1 - 2 % chaux + 4 - 6 % liant hydraulique
Un seul traitement (LHR contenant de la chaux)		4 à 8 %

Tableau 3 *Tableau de synthèse indiquant, en fonction de la plasticité du sol (traduite par la valeur de l'Ip ou de la MB[13]), le traitement de stabilisation à envisager ainsi que les dosages pratiqués*

Remarques

- Les valeurs mentionnées dans ce tableau sont données à titre indicatif pour orienter le choix de l'utilisateur mais ne peuvent en aucun cas être utilisées comme critère de choix du type d'agent de traitement. Ce choix doit se faire sur base d'une étude complète d'identification du type de sol (cf. chapitre I.3.1 *Essais d'identification du sol*), de l'état hydrique du matériau et des performances à atteindre.

- Le dosage à appliquer varie selon le type de sol, son état hydrique et les performances à atteindre. Dans tous les cas, des essais préalables seront effectués pour déterminer le dosage optimum à utiliser, aussi bien en ce qui concerne les performances mécaniques à atteindre que le prix du traitement (cf. chapitre I.3.3 *Essais de formulation*).

13 *Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait qu'il n'y a pas de correspondance directe entre les valeurs de bleu et les indices de plasticité (le caractère gras indique quel est l'indicateur, Ip ou MB, le mieux adapté pour déterminer l'argilosité du sol).*

Sigle de l'entreprise

FICHE PRODUIT - partie normative

Fabriqué à x

Mise à jour du jj/mm/aa

Liant hydraulique routier selon EN 13282

Appellation normalisée	Date: jj/mm/aa
Appellation commerciale éventuelle	Date: jj/mm/aa

Disponibilités: vrac

Composition déclarée (%)

Constituant	%	Activant de prise	%
Clinker (K)	___	Gypse	___
Laitier de haut-fourneau (S)	___	Anhydrite	___
Chaux (CL)	___		
Sulfate de calcium (Cs)	___	**Additif**	
Pouzzolanes naturelles (P)	___		
Cendres volantes siliceuses (V)	___		___
Cendres volantes calciques (W)	___		___
Calcaires (L ou LL)	___		___
Cendres volantes (Va ou Wa)	___		
Constituants secondaires	___		

Résistances à la compression (MPa)

7 d ___ MPa 28 d ___ MPa 56 d ___ MPa

Caractérisation physique

Sur poudre
- Masse volumique ___ (g/cm³)
- Refus à 90 µm ___ (%)

Sur pâte pure
- Stabilité ___ (mm)
- Début de prise ___ (min)
- Essai eau froide ___

Sur mortier
- Début de prise ___ (mm)
- Stabilité ___ (mm)

Caractérisation chimique (%)

SiO_2 ___ (%)	Al_2O_3 ___ (%)	Fe_2O_3 ___ (%)	CaO ___ (%)
MgO ___ (%)	SO_2 ___ (%)	CaOol ou OH___ (%)	

Valeurs ci-dessus indicatives: susceptibles de varier dans les limites autorisées par les normes.

Sigle de l'entreprise

FICHE PRODUIT - partie informative

Fabriqué à x

Mise à jour du jj/mm/aa

Appellation complète

Description succincte du domaine d'emploi

Sur base d'un ou plusieurs sols bien identifiés:
données chiffrées des performances accessibles en fonction d'un dosage moyen

Sur base d'un ou plusieurs sols bien identifiés:
données chiffrées des performances accessibles en fonction d'un dosage moyen

Ce produit est réglementé selon les Directives européennes 67/548/CEE, 1999/45/CE, NF T 01-100, leurs adaptations et leurs annexes.
Une fiche sécurité est disponible sur demande.

Figure 23 Exemple de fiche produit avec données techniques



Chapitre 3
Modalités d'exécution

On distingue en principe **deux méthodes** lors d'un traitement de terres:

- le malaxage **en place** de l'agent de traitement (chaux et/ou liant hydraulique) dans le sol;
- le malaxage du sol et de l'agent de traitement **dans une installation** de malaxage.

Ces deux méthodes se différencient d'une manière générale par les avantages et inconvénients suivants:

Investissement	Le malaxage en place nécessite un plus faible investissement qu'une installation de malaxage.
Manipulation du sol	Le malaxage en place demande moins de manipulations du sol et ne nécessite pas de stockage temporaire des terres excavées et malaxées. Dans le cas d'une installation de malaxage, la terre doit être excavée, transportée vers l'installation et le produit traité doit ensuite être ramené sur chantier.
Formation de poussière	Le malaxage en place peut engendrer la formation de poussière (cf. tableau 6, page 65). Avec une installation de malaxage, la formation de poussière peut être limitée du fait que l'agent de traitement est directement dosé dans le malaxeur.
Dosage de l'agent de traitement	Dans une installation de malaxage, en particulier du type discontinu (malaxeur séparé) le dosage du sol et de l'agent de traitement permet de mieux maîtriser la phase de malaxage que dans le cas d'un malaxage en place.
Homogénéité du mélange	Dans une installation de malaxage, le contrôle continu de quantités dosées permet de mieux garantir l'homogénéité du mélange que dans le cas du malaxage en place.
Multifonctionnalité	Certaines installations de malaxage peuvent être utilisées pour d'autres applications. Dans le cas d'un traitement en place, certaines machines peuvent être utilisées pour d'autres usages.
Permis d'environnement	Les installations de traitement requièrent souvent l'obtention d'un permis d'environnement; ce qui n'est pas le cas pour le traitement en place.

Tableau 4 *Avantages et inconvénients des deux méthodes d'un traitement de terres*

Comme il apparaît dans le tableau ci-dessus, le choix de la technique de travail dépend de paramètres très différents tels que le domaine d'application, les exigences du cahier des charges, les frais d'investissement, les coûts de fonctionnement, l'environnement, la possibilité d'effectuer des contrôles durant le malaxage, la possibilité de combiner le traitement à d'autres applications, etc.

Il convient donc de considérer chaque projet au cas par cas.

III.1 Traitement en place du sol avec l'agent de traitement

Le traitement d'un sol, que ce soit pour une amélioration ou une stabilisation, se fait toujours par couche d'épaisseur appropriée aux possibilités de l'engin de malaxage qui sera utilisé. Cette couche aura éventuellement été ameublie par une scarification préalable.

Les travaux de traitement de sols se caractérisent par la nécessité de mettre en œuvre une grande variété de matériels et de techniques d'exécution:

- préparation du sol;
- épandage;
- malaxage;
- aération du mélange;
- compactage.

Ces opérations peuvent s'intercaler de différentes manières dans la succession des opérations de terrassement.

III.1.1 Composition d'un atelier de traitement

L'équipement de base d'un atelier de traitement est le suivant:

- équipement de stockage (silo);
- bulldozer (ou niveleuse) équipé d'un ripper;
- épandeur;
- malaxeur.

A cela s'ajoute le matériel propre à la réalisation de l'ouvrage:

- remblai:
    - atelier d'extraction - transport (bulldozer, scraper);
    - bulldozer;
    - compacteur;

- plate-forme (fond de coffre, fondation, sous-fondation):
    - arroseuse;
    - compacteur;
    - niveleuse;
    - transport (bulldozer, scraper) (matériaux résultant du réglage);
    - matériel pour protection de surface (enduit, etc.).

III.1.2 Livraison et stockage (réf. 35, 28)

A la livraison, il convient de vérifier la conformité de l'agent de traitement (fiche technique, attestation de conformité du produit, certificat d'origine et marquage CE).

La quasi-totalité des agents de traitement utilisés à ce jour pour le traitement des sols sont pulvérulents (chaux, ciment, liant hydraulique routier), à l'exception du lait de chaux. Ils doivent être stockés dans des endroits secs et fermés.

III.1.2.1 Fournitures en sac

L'approvisionnement par sacs ne se justifie que pour des chantiers de petite taille ou de géométrie complexe. L'agent de traitement peut être livré en sacs de 25 à 50 kg ou en big bags de 1,5 tonnes, généralement sur palettes. Les sacs doivent être protégés de l'humidité et des courants d'air (sous une bâche imperméable ou dans un abri, dans ce cas les sacs ne peuvent toucher les parois du hangar). Les sacs sont placés au moins 5 cm au-dessus d'une aire bétonnée. Dans le cas de palettes, on utilisera une housse de protection étanche.

III.1.2.2 Fournitures en vrac

Les livraisons d'agents de traitement se font essentiellement en vrac, par camions citernes de 25-30 tonnes. L'agent de traitement peut être déchargé directement dans l'épandeur ou stocké dans des silos étanches, à l'abri de l'air et de l'humidité.

Il existe plusieurs types de silos:

- citernes désaffectées de transport routier. Leur capacité est limitée à 25/30 tonnes;
- silos horizontaux mobiles de 50 à 100 tonnes de capacité. Ils peuvent être facilement déplacés à vide, ce qui permet de limiter les distances de remplissage des épandeurs. Ils sont parfaitement adaptés aux chantiers linéaires (routes, voies ferrées, etc.);
- silos fixes, généralement verticaux, de capacité comprise entre 50 et 350 tonnes. Ils sont surtout utilisés sur de gros chantiers non linéaires ou pour les centrales de traitement.



Figure 24 *Silo horizontal semi-mobile*

III.1.2.3 Capacité de stockage et organisation des approvisionnements

L'agent de traitement est généralement chargé pneumatiquement dans l'épandeur directement à partir de la citerne de transport. Cela implique une parfaite coordination entre le producteur d'agent de traitement et le chantier (comme la capacité des épandeurs actuels varie entre 4 et 15 tonnes et que celle du camion citerne est de 25-30 tonnes, celui-ci devra vider son chargement en plusieurs opérations).

Toutefois, pour les chantiers importants, il est recommandé de stocker l'agent de traitement dans des silos-tampons. Cette préoccupation répond à un double objectif:

- disposer d'une réserve suffisante pour absorber les aléas divers;
- sur les gros chantiers, bénéficier d'un volume de stockage permettant le refroidissement des agents de traitement, lorsque la demande est importante et qu'ils arrivent encore chauds, ce qui impose de nombreux réglages pour obtenir un épandage uniforme. Il est souhaitable de disposer d'une capacité de stockage correspondant à au moins un jour d'activité moyenne de traitement.

III.1.2.4 Durée limite du stockage

III.1.2.4.a Agent de traitement livré en sacs

La durée limite de stockage des sacs dépend de leur mode de stockage:

- sous hangar non humide à peine ventilé, on peut aller jusqu'à trois mois;
- sous bâche en plein air, on ne dépassera pas quelques jours à un mois au maximum selon la saison.

III.1.2.4.b Agent de traitement livré en vrac

Stocké en vrac, l'agent de traitement est en permanence en contact avec l'air ambiant, notamment à l'occasion des vidanges et remplissages successifs des silos. Cette situation n'est pas trop gênante en période sèche; elle le devient en période humide car l'agent de traitement peut s'hydrater partiellement et perdre ainsi ses qualités et obturer les conduites des silos. Pour cette raison, il est conseillé de limiter la durée du stockage entre 15 jours et un mois selon l'agent de traitement et la saison.

Si l'agent de traitement doit être stocké durant une longue période ou s'il a séjourné dans des conditions de conservation mal connues, des essais de contrôle seront effectués (pour la chaux vive, on pourra vérifier la réactivité et le CaO disponible).

III.1.2.5 Précautions particulières

La livraison de chaux et/ou de liant hydraulique est l'une des opérations les plus délicates pour le personnel (risques de projection dans les yeux, etc.). Il convient donc de respecter scrupuleusement les règles de précaution décrites au chapitre III.9 *Précautions élémentaires*.

On vérifiera le bon fonctionnement des accessoires de transvasement: pompes, filtres, manchons de raccordement, ventilateurs, pour préserver la sécurité du personnel de chantier et de livraison.

III.1.2.6 Choix du lieu de stockage

Les aspects suivants seront à prendre en compte:

- **accessibilité**: il convient de choisir l'aire de stockage à un endroit facilement accessible en tout temps pour les camions porteurs et épandeurs (chemin d'accès propre, solide et toujours accessible quelles que soient les conditions météorologiques);
- **proximité du chantier**: l'aire de stockage doit être suffisamment proche du lieu de traitement;
- **nuisances dues aux poussières**: compte tenu des nuisances éventuelles que peuvent provoquer les opérations de transvasement de l'agent de traitement, on veillera à implanter la zone de stockage dans un endroit suffisamment éloigné des habitations et des pâturages, on tiendra également compte des vents dominants;
- **disponibilité d'un espace suffisant**: l'aire de stockage doit avoir une dimension suffisante pour recevoir simultanément un épandeur et le camion citerne d'approvisionnement.

III.1.3 Préparation du sol (réf. 28, 35)

Certains sols exigent une préparation avant de pouvoir être traités. Cette préparation du sol peut conditionner la réussite du chantier, tant sur le plan économique que technique.

Elle permet de:

- faciliter le travail du malaxeur;
- modifier l'état hydrique du sol.

On distingue essentiellement les opérations suivantes:

- **Scarification**: cette opération élimine les gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, ameublit et aère le sol. Elle permet:
  - d'améliorer les rendements des malaxeurs;
  - de réduire l'usure des couteaux des appareils;
  - d'assécher le sol (si les conditions climatiques sont favorables).

  Elle se réalise à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue.

- **Humidification**: il s'agit d'une opération très difficile à réaliser car l'arrosage se fait en surface alors qu'on recherche une humidification homogène dans la masse. La méthode les plus courante consiste en:

- une scarification;
- un arrosage à l'aide d'arroseuses de type gravitaire, à pression ou à pompe ou un arrosage en profondeur à l'aide d'une arroseuse enfouisseuse (machine permettant un ajout d'eau avec débit et répartition contrôlés, ce qui améliore la cinétique et l'homogénéité d'hydratation des matériaux; diminution des pertes d'eau).

Certains malaxeurs sont équipés d'une rampe d'injection (raccordée à une citerne d'eau qui accompagne le malaxeur) qui arrose le matériau foisonné dans la masse. Ceci permet de regrouper deux opérations en une.



Figure 25 Scarificateur

Remarque

- On évitera d'ouvrir le sol s'il y a un risque de pluie car un sol scarifié facilite l'infiltration de l'eau, ce qui risque de gêner considérablement la suite des opérations.



Figure 26 Arroseuse-enfouisseuse



Figure 27 Arroseuse

- **Criblage** éventuel: pour un malaxage en installation prévue à cet effet, il peut s'avérer nécessaire de procéder à un criblage du sol à traiter afin d'éliminer les gros éléments dont les dimensions sont supérieures à la dimension maximale admissible par l'installation.

III.1.4 Epandage (réf. 11, 26, 35)

III.1.4.1 Matériel

On utilise des épandeurs à dosage volumétrique à trémie fermée, autotractés ou remorqués par camion, tracteur agricole ou bulldozer sur chenilles. Ces épandeurs déversent l'agent de traitement à l'arrière.

On distingue:

- les **épandeurs à dosage volumétrique non asservi à la vitesse d'avancement**: épandeurs de la première génération, ils se règlent en deux temps. Leur point faible est l'imprécision de l'épandage. Ce type d'épandeur n'est pas à utiliser lorsque le but du traitement est une stabilisation;

- les **épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement**: ce sont les engins les plus répandus. Le dosage est rendu dépendant de la vitesse d'avancement par un asservissement de la vis de répartition à la rotation d'un essieu;

- les **épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement et à contrôle pondéral:** ils se distinguent du modèle précédent par de nombreux perfectionnements (régularisation de l'écoulement de l'agent de traitement, enregistrement des données de fonctionnement, sécurités, etc.) ainsi que par la présence d'un contrôle pondéral embarqué grâce à des pesons électroniques placés sous la cuve. Le réglage est simplifié et la précision de l'épandage améliorée.



Figure 28 Epandeur

Le choix d'un épandeur dépend de la précision recherchée ainsi que des caractéristiques particulières telles que: capacité, aptitude à circuler sur des sols difficiles, débit, réglage de la largeur d'épandage, équipements susceptibles de faciliter la conduite, hauteur de chute de l'agent de traitement, indicateurs du niveau de remplissage de la cuve, etc.



Figure 29 *Epandeur remorqué par un tracteur agricole*



Figure 30 *Epandeur autotracté sur chenilles*

Cas particuliers:

- agent de traitement fourni en sac: l'épandage se fait manuellement en disposant les sacs sur le terrain préalablement quadrillés en fonction du dosage recherché. Les sacs sont ensuite déchirés et le produit est étalé au râteau;
- agents de traitement liquides (lait de chaux, coulis de ciment): ils peuvent être épandus à l'aide d'une arroseuse de taille et de débit adaptés au chantier. Un doseur volumétrique asservi à la vitesse d'avancement améliore la précision de l'épandage.

III.1.4.2 Largeur

La largeur d'épandage est de l'ordre de 2 m. Il est possible de la faire varier en travaillant par demi-largeur d'épandage grâce à un système de rampes d'élargissement. Ce dispositif permet d'éviter les recouvrements excessifs de bandes.

III.1.4.3 Capacité

La capacité des matériels actuels varie entre 4 et 15 tonnes. La plage de débit varie, pour les engins courants, entre 6 et 30 kg/m^2, et pour les plus récents entre 5 et 60 kg/m^2.

III.1.4.4 Taux d'épandage

La quantité d'agent de traitement à épandre est calculée par la formule suivante:

$$M = h \times \rho_d \times c/100$$

M = kg d'agent de traitement / m^2;
c = dosage en agent de traitement visé (fixé par l'étude de traitement) (en % du poids de sol sec);
ρ_d = masse volumique sèche en place du sol à traiter (en kg/m^3);
h = épaisseur de malaxage (en m).

Pour des dosages élevés, il est préférable d'effectuer l'épandage en deux passes, séparées par une passe du malaxeur.

Remarque

- Il faut se réserver la possibilité d'ajuster les dosages définis par l'étude en laboratoire en fonction des conditions réelles d'exécution sur chantier (conditions météorologiques, état hydrique du sol, etc.) afin d'éviter les surdosages inutiles. Les économies ainsi réalisées justifient la présence d'un laboratoire sur le chantier si celui-ci est important.

III.1.4.5 Alimentation des épandeurs

L'épandeur est alimenté pneumatiquement, soit directement du camion de livraison, soit du silo, ou par l'intermédiaire d'un véhicule citerne faisant la navette entre le silo et le chantier, ou encore en marche dans «un train d'épandage» (tracteur – citerne – épandeuse) lorsque la portance du terrain le permet.

III.1.4.6 Précision des épandeurs

La précision des épandeurs est donnée par un coefficient de variation Cv (en %):

$$Cv = (\sigma/m) \times 100$$

m = valeur moyenne des pesées (en kg/m^2);
σ = écart-type (paramètre donnant la mesure de la dispersion des pesées autour de la moyenne).

Sur chantier, il est actuellement difficile de descendre en dessous d'un Cv de 10 à 20 %. Seuls quelques épandeurs, dont celui à contrôle pondéral, permettent d'atteindre un Cv de 5 à 10 % dans des conditions fiables et répétitives.

La précision dépend de trois paramètres essentiels:

- du type d'appareil (hauteur de chute de l'agent de traitement, indicateurs de manque d'agent de traitement, facilité de réglage du dosage, possibilité d'aide à la conduite, etc.);
- du niveau d'entretien de l'appareil (jupes en caoutchouc canalisant l'agent de traitement vers le sol, système de réglage du dosage, etc.);
- du savoir-faire du conducteur (vitesse de translation, recouvrement des bandes, respect du nombre de passes).

III.1.4.7 Contrôle de l'épandage

Deux méthodes peuvent être utilisées pour contrôler l'épandage:

- Pesées périodiques de l'agent de traitement recueilli dans des bâches de surface connue disposées sur le sol avant passage de l'épandeur. La quantité recueillie s'obtient par différence de poids de la bâche avec ou sans agent de traitement. La bâche peut sur certains sols se déformer et ne pas présenter la même surface, c'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des plateaux en aluminium, plus lourds et moins déformables.

- Contrôle du poids total de l'agent de traitement répandu divisé par la surface couverte. Il s'agit d'une méthode globale s'appuyant sur un contrôle pondéral associé à une mesure de surface.

Ces deux méthodes peuvent être appliquées:

- au démarrage des travaux pour étalonner l'épandeur et le régler au dosage voulu (ou lors de la réalisation de la planche d'essai cf. chapitre III.3 *Planche d'essai*);

- en cours de travaux: il s'agit de vérifier la quantité d'agent de traitement répandu par unité de surface ainsi que le bon fonctionnement et la bonne utilisation du matériel.

III.1.4.8 Rendement d'un épandeur

La détermination du rendement d'un épandeur doit tenir compte du cycle complet de son fonctionnement: remplissage, trajet silo - chantier, épandage, trajet chantier - silo. Le temps mis par un épandeur de 15 tonnes de capacité pour réaliser ce cycle varie entre 1/2 h et 1 h.



Figure 31
Contrôle de l'épandage: pesée de l'agent de traitement épandu sur un plateau en aluminium

III.1.4.9 Précautions particulières

Les précautions à prendre pour limiter les nuisances induites par l'émission des poussières sont détaillées au chapitre III.9 *Précautions élémentaires*.

III.1.5 Malaxage

Le malaxage consiste à mélanger l'agent de traitement et le sol afin d'incorporer l'agent de traitement de façon homogène.

D'une manière générale, plus les sols sont argileux, plus ils sont difficiles à malaxer (nombre de passes plus élevé, malaxage plus intensif). Toutefois, certains sols très argileux ont pu être malaxés avec succès. Dans ce cas, plusieurs passes de malaxage s'avèrent souvent nécessaires.

Lorsque l'on épand un agent de traitement pulvérulent, il est recommandé de faire suivre l'épandeuse le plus près possible par l'engin malaxeur qui incorpore l'agent de traitement à la couche de sol traitée.

Cette mesure permet d'éviter la dispersion de l'additif par le vent et assure une utilisation optimale de celui-ci.

Le choix de l'engin de malaxage dépend de la nature du sol, de la taille et du type de chantier.

Il est important de respecter un bon équilibre entre la capacité de malaxage et la capacité disponible de compactage (y compris en ce qui concerne l'épaisseur des couches).

III.1.5.1 Evaporation par malaxage et aération

Dans le carter de l'engin malaxeur-pulvérisateur se produit une évaporation notable d'eau. Cet effet peut être accentué en ouvrant le volet arrière du carter lors de la deuxième passe, le danger de projection de poudre d'agent de traitement n'existant plus à ce moment-là. Le sol pulvérisé non compacté exposé à l'air continue de perdre de l'eau par évaporation (réf. 26).

D'une manière générale, les méthodes de travail ne permettant pas ou peu au sol d'être aéré (systèmes fermés, malaxage du sol directement dans la tranchée, compactage effectué immédiatement après le malaxage, etc.) permettent généralement de bien contrôler les émissions de poussière mais sont moins efficaces en termes de diminution de la teneur en eau du sol que les méthodes de travail exposant d'avantage le sol aux conditions atmosphériques.

III.1.5.2 Largeur de travail

2 à 3 m selon le modèle.

III.1.5.3 Puissance

Pour les engins les plus utilisés sur les grands chantiers, la puissance dépasse 300 CV.

III.1.5.4 Nombre de passes

Il dépend du type d'engin malaxeur. Généralement, deux passes de malaxeur à rotor suffisent pour obtenir une pulvérisation et une homogénéisation suffisantes du sol traité. En pratique, lorsque la chaux vive est utilisée, la deuxième passe de malaxeur (5 à 15 minutes après la première) est la plus efficace du point de vue de l'assèchement car elle s'opère sur le mélange sol-chaux déjà échauffé par l'extinction de la chaux vive. Ainsi, si l'on recherche un assèchement maximal, il est avantageux d'effectuer au moins deux passes de malaxage et de laisser la couche de mélange sol-chaux pulvérisée exposée à l'air aussi longtemps que le permettent le cycle de terrassement et les circonstances atmosphériques (réf. 30).

III.1.5.5 Profondeur de malaxage

La profondeur de malaxage varie de 20 cm à 40 cm avec une bonne moyenne de 30 cm. Elle dépend du type d'engin malaxeur et de la consistance du sol.

III.1.5.6 Contrôles

III.1.5.6.a Contrôle de la profondeur de malaxage

- **En cours de malaxage**: on peut évaluer visuellement la profondeur de pénétration de l'outil dans le sol (disques, socs). Il existe également divers systèmes de contrôle prévus par les constructeurs. Pour maintenir la bonne profondeur de malaxage, on peut faire appel à des méthodes au laser ou d'autres techniques spécifiques développées par les constructeurs;

- **Après malaxage**: il faut faire des sondages à intervalles réguliers dans le sol traité. La profondeur d'action est indiquée par un changement de consistance ou de couleur. La profondeur de malaxage peut également être déterminée en enfonçant manuellement une tige dans le sol pour localiser la surface de transition. Une alternative consiste à projeter de la phénolphtaléine sur la paroi du sondage. Le virage au rouge révèle un milieu fortement basique, caractéristique de la présence de chaux ou de liant hydraulique.

III.1.5.6.b Contrôle de l'homogénéité du mélange (réf. 35)

Ce contrôle s'effectue à la fin du malaxage, en creusant des séries de trous à intervalles réguliers d'une profondeur un peu supérieure à celle du traitement et en examinant à la fois la finesse de la mouture et la bonne répartition de l'agent de traitement.

- **Mouture**: on l'apprécie visuellement ou, en cas d'hésitation, par un tamisage à sec. Dans les sols fins (limons, argiles peu plastiques), on recherche une mouture inférieure à 20 mm.

- **Homogénéité**: son contrôle rigoureux implique des prélèvements pour analyses en laboratoire (composition chimique, performances mécaniques) en général longues et délicates. Dans l'état actuel des

choses, on se contente d'un contrôle visuel basé sur la mouture, la couleur et la consistance. Les échantillons doivent être de teinte uniforme (sans traînées ou zébrures foncées ou claires), sur toute la hauteur et comparables les uns aux autres. Si ce n'est pas le cas, il conviendra de continuer le malaxage. C'est le conducteur de l'engin de malaxage qui effectue ces contrôles ainsi que le chef de chantier en présence du surveillant.

III.1.5.7 Considérations pratiques

- La circulation du malaxeur sur l'agent de traitement épandu est inévitable. Il y a donc lieu de faire attention à ne pas modifier la répartition de l'agent de traitement pendant les mouvements de la machine:

  - en limitant la vitesse de translation;
  - en supprimant les manœuvres inutiles;
  - en veillant à ce que la ventilation du moteur ne crée pas de perturbations susceptibles de provoquer de la poussière.

- Le malaxage foisonne énormément les matériaux qui forment un chanfrein de part et d'autre de la bande malaxée. Il est impératif, lorsqu'on traite par bandes jointives, de mordre abondamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordure des bandes (réf. 35).

- Les bras du rotor sont relativement vulnérables aux pierres. Ils le sont un peu moins dans un type d'engin dont le rotor tourne «à rebrousse-poil», c'est-à-dire dans le sens de rotation opposé à celui des roues. Pour les terrains pierreux, il n'existe pas encore de solution parfaite; la charrue à disques semble être plus appropriée mais de nombreuses passes sont nécessaires pour obtenir une pulvérisation suffisante (réf. 11).

- Si l'obtention de l'épaisseur de malaxage désirée se révèle difficile ou impossible à atteindre par le type de malaxeur envisagé, il est recommandé de procéder à un malaxage en deux étapes. Dans ce cas, le sol doit être légèrement compacté après le premier malaxage. Le compactage intermédiaire réduit l'épaisseur de la couche de sol, ce qui permettra, lors du deuxième passage du malaxeur, de traiter une plus grande épaisseur de terre. De même, si l'obtention de la granularité demandée se révèle difficile ou impossible par suite du caractère argileux et incohérent du sol, il est recommandé de procéder à un double malaxage avec compactage intermédiaire.

Le tableau 5 (page 51) reprend les caractéristiques majeures des principaux engins de malaxage. Vu l'évolution perpétuelle du marché, la liste mentionnée ci-après est une liste non exhaustive donnée à titre indicatif.

III.1.6 Malaxage

III.1.6.1 Malaxeurs à outils fixes

Les malaxeurs à outils fixes consistent en des machines agricoles telles que charrues, herses, etc. Elles sont utilisées pour un malaxage grossier, acceptable pour des traitements d'**amélioration**. Avec ces machines, il est difficile de contrôler l'épaisseur de la couche traitée et la qualité du malaxage. Elles peuvent cependant constituer une alternative relativement bon marché pour les chantiers de petite taille.

On distingue:

III.1.6.1.a Les charrues à disques

Les charrues à disques comportent quasiment toujours deux rangées de disques, formant entre elles un angle réglable, dont dépend plus ou moins la profondeur d'action et la finesse de mouture du sol.

Choisies parmi les plus lourdes (4 à 8 tonnes), éventuellement lestées, elles doivent être munies de disques de grand diamètre (0,8 à 1,2 m) sous peine de devenir rapidement inopérantes dans le matériau foisonné.

Types et caractéristiques	Utilisation	Rendements
Charrues (disques-socs)		
Modèles lourds Tractées par un moteur puissant (> 300 CV pour modèle travaux publics) Profondeur de malaxage: 20 à 40 cm Largeur de travail: 2 à 3 m	Sols argileux, craie D_{max} < 300 à 500 mm Amélioration	200 à 600 m^3/h Selon chantier
Rotobêches		
Modèles lourds agricoles Portées par un tracteur agricole (> 100 CV) Profondeur de malaxage: 30 à 35 cm Largeur de travail: 2,5 à 3 m	Sols argileux D_{max} < 200 mm Amélioration	100 à 300 m^3/h
Pulvimixers à arbre horizontal		
Automoteurs (300 à 450 CV) Profondeur de malaxage: 30 à 55 cm Largeur de travail: 2 à 2,5 m	D_{max} < 50 mm Stabilisation – amélioration	200 à 400 m^3/h
Broyeurs et fraises attelés à des machines		
Profondeur de malaxage: jusqu'à 50 cm Largeur de travail: 2,5 m	D_{max} < 50 mm Stabilisation – amélioration	200 à 400 m^3/h

Tableau 5 *Caractéristiques majeures des principaux engins de malaxage*

Elles doivent être tirées par des tracteurs puissants (> 300 CV) (à chenilles ou à pneus). Toutefois, leur profondeur d'action dans le matériau non foisonné ne dépasse pas 20 à 25 cm dans le meilleur des cas. Des progrès sont attendus avec des matériels conçus par les entreprises, portés par des tracteurs de forte puissance. La largeur ordinaire est de l'ordre de 2 à 3 m avec possibilité d'accouplement.

Les charrues à disques peuvent travailler dans les sols limoneux et argileux, y compris lorsqu'ils contiennent des cailloux ou des blocs en proportion notable. Cependant, leur efficacité devient critique lorsque la dimension des blocs provoque leur coincement entre les disques ou s'oppose à la pénétration des outils dans le sol (D_{max} > 300 à 500 mm).





Figure 32 *Charrue à disques*

Leur domaine d'emploi est principalement celui du traitement à la chaux des sols argileux et humides en vue d'une réutilisation en remblai ou pour améliorer des pistes de chantier ou des zones instables. La mouture obtenue, plutôt grossière, ne permet d'envisager leur emploi pour d'autres applications que lorsqu'on recherche des caractéristiques modestes.

Un inconvénient de ces charrues est leur faible maniabilité car elles sont tractées et leur taille fait qu'il n'est pas facile de tourner. Sur certains modèles, les disques sont relevables hydrauliquement, ce qui améliore les conditions de déplacement.

La détermination du rendement prend en compte la profondeur et la largeur de travail ainsi que la vitesse du tracteur (2 à 4 km/h) et le nombre de passes nécessaires (entre 3 et 8). Il varie entre quelques centaines de m^3/h dans les formations plastiques blocailleuses et près de 600 m^3/h dans les limons peu plastiques.

III.1.6.1.b Les charrues à socs

Assemblés sur un châssis porté par un tracteur à chenilles puissant (généralement > 300 CV), les socs ont une forme (classique, en entrave, etc.) et une disposition (angle d'attaque, écartement, etc.) adaptées aux caractéristiques du matériau à traiter. La maniabilité de ces charrues est celle du tracteur sur lequel elles sont montées.

La profondeur d'action dépend de la dimension des socs. Elle peut atteindre 30 à 40 cm de matériau non foisonné pour une largeur de l'ordre de 2 à 3 m.

Les charrues à socs sont réservées aux sols compacts, elles sont principalement utilisées pour l'amélioration des sols argileux et humides à la chaux et donnent d'excellents résultats dans le traitement des craies à la chaux.



Figure 33 Charrue à socs

Le diamètre maximal des grains du sol est également de l'ordre de 300 mm.

Comme pour les charrues à disques, le calcul du rendement prend en compte profondeur et largeur de travail, vitesse de translation (2 à 4 km/h) et nombre de passes (4 à 6).

Il existe une variante à ce genre de matériel qui consiste à placer, à l'avant d'un bulldozer, un râteau ou un peigne dont l'écartement et la forme des dents sont déterminés en fonction du matériau à traiter.

III.1.6.2 Malaxeurs à outils animés (réf. 35, 39, 42)

Les malaxeurs à outils animés sont utilisés pour un malaxage fin.

On distingue:

III.1.6.2.a Les rotobêches

Seuls les plus gros de ces engins agricoles peuvent convenir en traitement de sols. Ces engins comportent une série de bêches fixées sur un vilebrequin entraîné en rotation par la prise de force d'un tracteur. Les bêches pénètrent dans le sol et le projettent par tranches sur un carter muni de barreaux qui achèvent sa pulvérisation.

Portées par des tracteurs de puissance moyenne (100 CV), les rotobêches les plus lourdes ont une profondeur d'action de 30 à 35 cm pour une largeur de travail ordinaire de 2,5 à 3 m.

Leur action est limitée lorsque la proportion d'éléments supérieurs à 200 mm dans le sol devient significative.

Le domaine d'emploi est identique à celui des charrues à disques (sols argileux humides) mais la qualité du malaxage est supérieure et plus favorable à une utilisation en fond de coffre.
Les rendements vont de 100 à 300 m^3/h.

III.1.6.2.b Les pulvimixers (ou pulvérisateurs) à arbre horizontal

Ce sont des matériels autonomes, c'est-à-dire avec tracteur et malaxeur indissociables, spécialement conçus pour les besoins de la technique.



Figure 34 Pulvimixer

Ils sont composés d'un tracteur comportant un tambour dont l'axe, muni de couteaux ou de pioches, est horizontal et perpendiculaire au sens de déplacement de l'engin. Le tambour est entraîné en rotation hydrauliquement ou mécaniquement et enfoncé dans le sol à l'aide de vérins jusqu'à la profondeur désirée. L'axe horizontal tourne à une vitesse de l'ordre de 200 t/min.

La finesse de la mouture dépend de la vitesse d'avancement de la machine et de l'ouverture de la trappe arrière du carter qui permet d'ajuster le temps de séjour du matériau dans la chambre de malaxage. Le sens de rotation du rotor a une influence sur la qualité du malaxage. On constate qu'une rotation dans le sens inverse de celui des roues motrices donne de meilleurs résultats (finesse de mouture et régularité de l'épaisseur traitée). La puissance des machines couramment utilisées va de 300 à 450 CV. La largeur de coupe varie de 2 m à 2,50 m, la profondeur de 30 à 55 cm. Certaines peuvent être équipées d'une rampe d'injection d'eau dans la chambre de malaxage.

Ces matériels travaillent dans des conditions mécaniques acceptables lorsque les gros éléments du sol sont < 50 mm. Au-delà (jusqu'à D < 200 mm), ils peuvent encore convenir lorsque ces éléments sont tendres et peu abrasifs (craie, calcaire tendre, etc.). Leur utilisation n'est plus envisageable lorsque les roches sont dures (silex, granit, meulières, etc.) et de surcroît enchâssées dans une matrice argileuse compacte.

Les outils (couteaux, pioches) sont les principales pièces d'usure de ces matériels. Ils doivent être changés périodiquement en fonction de l'abrasivité du sol et de la nature du métal (acier ordinaire, acier traité, pastilles de carbure de tungstène).

Le choix des outils ne doit pas se faire sur la simple considération de leur prix, mais en prenant également en compte la durée de vie et le temps de remplacement qui peut conduire à des immobilisations fréquentes de l'atelier de traitement.

La qualité du malaxage (finesse de mouture, homogénéité du mélange) obtenue avec ce matériel sur des sols granulaires est de loin la meilleure, par rapport aux autres matériels, et comparable à celle obtenue avec les malaxeurs de centrales fixes.

S'ils conviennent parfaitement à l'**amélioration** des sols peu charpentés pour une réutilisation en remblai, leur emploi est fortement recommandé pour des opérations de **stabilisation**.

Les rendements varient entre 200 et 400 m^3/h, selon que l'on malaxe en 1 à 2 passes pour une réutilisation en remblai ou 2 à 4 passes pour une réutilisation en sous-fondation.

Actuellement, il existe environ une dizaine de modèles de ces pulvérisateurs. Malgré leurs éventuelles similitudes morphologiques, on ne peut pas considérer que tous produisent des mélanges de même qualité. Les pulvérisateurs les plus performants sont les plus puissants et ceux dont la chambre de malaxage est placée entre les trains de roulement avant et arrière.



Figure 35 *Exemples de broyeurs montés sur tracteurs*



Figure 36 Godet malaxeur – broyeur



Figure 37 *Système d'épandage et de malaxage monté sur le même tracteur*



Figure 38 *Recycleur à épandage intégré*

III.1.6.2.c Broyeurs et fraises à monter sur des machines

Il s'agit de matériel rotatif que l'on peut très bien comparer aux pulvérisateurs. En fonction du fabricant, ils sont fixés à l'avant ou à l'arrière de la machine porteuse. Celle-ci peut être un simple tracteur agricole. Certains modèles sont conçus pour broyer des fractions pierreuses importantes et peuvent donc traiter facilement des sols pierreux. Comme dans le cas des pulvérisateurs, le rotor de la fraise tourne dans le sens inverse des roues du tracteur.

Les configurations types ont une largeur d'action de 2,50 m, un rotor de 80 cm de diamètre et peuvent malaxer jusqu'à une profondeur de 50 cm à une vitesse de 0,5 à 3,0 km/h. Ces machines peuvent être utilisées pour mélanger des sols répandus en couches. Elles conviennent aux opérations d'**amélioration** et de **stabilisation**. Ces machines sont aussi très bien adaptées aux terrains de petites dimensions (parkings, petites routes, chantiers pour collecteurs).

III.1.6.2.d Machines intégrées

Des systèmes d'épandage et de malaxage sont montés sur le même tracteur (épandeur à l'avant et malaxeur à l'arrière), ce qui permet de réduire le nombre d'opérations sur chantier.

Certains «recycleurs» possèdent aussi un dispositif d'épandage intégré, ce qui permet de diminuer le nombre d'opérations et de réduire l'émission de poussières.

III.1.6.2.e Autres engins à outils animés

Il existe encore une série de machines qui, en plus du malaxage, permettent d'assurer d'autres fonctions comme le décohésionnement du matériau en place, le dosage-épandage, l'humidification, le réglage. Les machines pouvant démolir des structures routières complètes et les retraiter avec des liants hydrauliques en sont un exemple («recycleurs»). Ces machines sont disponibles sur roues ou sur chenilles. Leur masse s'élève à plus de 30 tonnes. Sur la plupart de ces machines, la fonction malaxage est réalisée par un tambour fraiseur équipé d'un grand nombre de dents. Celles-ci peuvent être facilement remplacées lorsqu'elles sont usées. Le sens de rotation du tambour est opposé à celui des roues. Une quantité précise d'eau peut être pulvérisée, pendant le fraisage, dans la chambre de malaxage. Le malaxage s'opère plus en profondeur en comparaison avec les machines de malaxage classiques. Les recycleurs conviennent à tous les types d'agent de traitement (également liquides) et sont utilisés pour des applications de **stabilisation**.

Figure 39
Exemple de recycleur pouvant être utilisé pour le traitement des sols en place

III.1.6.3 Godets cribleurs (réf. 42)

Les godets cribleurs peuvent en même temps cribler et malaxer. Ils peuvent être montés sur un grand nombre de machines de terrassement existantes (chargeuses, «bob-cats», pelles mécaniques). La paroi arrière du godet est pourvue de rotors qui permettent de cribler, d'aérer et de malaxer le sol soulevé pendant l'opération de chargement. Le matériel est actionné par la force hydraulique de l'engin porteur. Selon les fabricants, ces types d'appareils peuvent traiter sans problèmes des sols collants et humides.



Figure 40 Godet cribleur

Les investissements sont limités par rapport au coût d'autres installations. Le volume des godets varie généralement entre 0,6 m^3 et 2,9 m^3. En outre, l'équipement peut aussi être utilisé à d'autres fins: broyage de bois, criblage de terre arable, de compost, etc. Il est aussi utilisé en combinaison avec des installations fixes pour la mouture préalable du sol. Le rendement dépend fortement de la chargeuse utilisée.

On peut travailler de deux manières:

- **malaxer simplement le sol sur stock**, pendant le chargement vers le lieu d'utilisation ou un camion;
- **malaxer le sol directement dans la tranchée**. Cela évite de déplacer inutilement le sol et permet d'appliquer le traitement sur de très petits espaces. Il existe des appareils sur le marché permettant un dosage automatique de l'agent de traitement dans le sol via un mécanisme intégré. On évite ainsi l'épandage préalable d'agent de traitement et une partie du problème de la formation de poussière.

Le godet cribleur peut également être utilisé pour remblayer les tranchées. Pour ce type d'utilisation, il convient de disposer d'une largeur suffisante.

III.2 Traitement du sol avec l'agent de traitement dans une installation de malaxage

III.2.1 Composition d'un atelier de traitement

L'équipement de base d'un atelier de traitement est composé de:

- équipement de stockage;
- bulldozer, pelles mécaniques;
- installation mobile proprement dite.

A cela s'ajoute le matériel propre à la réalisation de l'ouvrage:

- Remblai:
  - atelier d'extraction - transport: bulldozer + scraper en général;
  - bulldozer pour le régalage des couches;
  - compacteur(s).

- Plate-forme (fond de coffre, fondation, sous-fondation):
  - arroseuse;
  - compacteur(s);
  - niveleuse;
  - matériel pour l'évacuation des matériaux résultant du fin réglage (scraper élévateur sur les chantiers importants par exemple);
  - matériel pour protection de surface (enduit, etc.).

III.2.2 Livraison et stockage

Les conditions de livraison et de stockage de l'agent de traitement sont les mêmes que celles explicitées pour le malaxage en place de l'agent de traitement avec le sol (cf. chapitre III.1.2 *Livraison et stockage*).

III.2.3 Epandage et malaxage

L'épandage et le malaxage sont réalisés directement dans l'installation.

Comme pour le traitement in situ (III.1. 5 *Malaxage*), l'homogénéité du mélange peut être appréciée par l'examen de la finesse de la mouture et de la bonne répartition de l'agent de traitement.

Il existe différents types d'installations de malaxage. Elles se distinguent par différents critères: type de malaxeur (continu ou discontinu), capacité, installation mobile ou fixe, etc.

Il n'est pas possible d'énumérer tous ces types d'installations. C'est pourquoi nous donnons ici un aperçu des différents composants les plus utilisés qui peuvent être combinés entre eux.

III.2.3.1 Dosage de la terre

Le dosage de la terre est un dosage massique et/ou volumétrique (avec possibilité de contrôler le poids en continu) à partir d'un réservoir de stockage avec bande d'extraction.

La terre pouvant être de qualité très variable, allant de sols sableux non cohésifs à des sols argileux collants, il faut accorder une attention particulière au type de trémie de dosage pour prévenir l'agglomération et éviter que le sol n'adhère aux parois du réservoir de stockage.

III.2.3.2 Dosage de l'agent de traitement

L'agent de traitement est dosé à partir d'un silo au moyen d'une vis de dosage. Il existe différents silos, ils peuvent être utilisés avec un cône vibrant pour éviter l'agglomération de l'agent de traitement à la sortie du silo.

Le dosage avec une vis n'étant pas très précis en raison des fluctuations de densité, certains constructeurs ont installé un système de dosage avec contrôle de pesée. Dans ce cas, le poids est contrôlé en continu et réajusté en fonction des fluctuations.

En cas de contrôle d'humidité sur la bande de transport, il est aussi possible d'adapter le dosage en agent de traitement à l'humidité du sol apporté.

III.2.3.3 Malaxage

Deux systèmes de malaxage du sol sont possibles:

- **malaxage continu**: la terre et l'agent de traitement sont dosés en continu dans le malaxeur;
- **malaxage discontinu**: la quantité de terre et d'agent de traitement dans le malaxeur sont dosés avant le mélange. Après le malaxage, le malaxeur est ouvert et le mélange est déchargé.

Le malaxage discontinu offre le plus souvent un mélange de meilleure qualité que le malaxage continu, mais limite le rendement.

Dans le choix du type de malaxeur, il convient de prendre en considération la présence éventuelle d'éléments étrangers (débris pierreux, blocs de béton, barres de fer, etc.) qui peuvent se trouver dans les terres excavées. Selon le type de malaxeur utilisé, ces éléments devront être éliminés en quantités plus ou moins importantes (précriblage, criblage, déferrisation, etc.).

III.2.3.4 Types d'installations de malaxage

III.2.3.4.a Installations mobiles

Dans les installations mobiles, on distingue:

- les systèmes **complets** conçus pour pouvoir être transportés **en une seule pièce**. Il ne faut pas imaginer que ce transport est aisé car il s'agit quand même de machines assez volumineuses;
- les systèmes constitués d'**éléments séparés** à assembler sur chantier.

L'avantage des systèmes complets réside dans la rapidité d'installation et la configuration compacte de l'ensemble une fois sur chantier. L'inconvénient est qu'il s'agit de machines lourdes et coûteuses qui sont difficilement modulables en fonction des besoins du moment.

L'avantage des systèmes constitués d'éléments séparés est que l'entrepreneur peut puiser certains éléments dans son parc de matériel pour composer le système et réaliser ainsi une économie. L'assemblage d'éléments séparés permet également d'adapter l'installation à la taille du chantier. Ce système présente l'inconvénient de devoir être monté et démonté pour chaque chantier.

1. Installations en une pièce

La grande centrale mobile constitue un premier type de matériel. Elle contient tous les accessoires nécessaires au traitement des sols et est montée sur un châssis pouvant être tracté par un camion. Le montage et le démontage s'effectuent assez rapidement car tout est pliable et rotatif. Une longueur de ± 19 m et une hauteur de ± 4 m constituent des dimensions typiques. Le rendement est de l'ordre de 120 m^3/h.







Figure 41 *Exemples d'installations mobiles (malaxeur intégré)*

Les malaxeurs intégrés constituent un autre type de matériel. Le fabricant prévoit généralement une machine compacte, complètement fermée, dont la longueur se situe aux environs de 10 m.

La plupart des machines sont fournies sur roues. Certains fabricants livrent des modèles sur chenilles. Dans la plupart des cas, le malaxeur reste sur place et est installé en position centrale afin de limiter le transport de terres.

Toutefois, ces machines peuvent, éventuellement, suivre un chantier de collecteur, ce qui réduit le transport de terres à un minimum. Cela n'est possible que sur de grands chantiers de collecteurs en milieu rural, vu la masse (± 35 tonnes) et le volume de ces machines. Il faut bien veiller à ne pas travailler trop près de la tranchée ouverte vu les charges induites dans le sol par la machine.

Le rendement de cette machine est de 100 à 200 m^3/h (matériau 0/80 mm). Le volume rentable minimum est d'environ 3 500 m^3/chantier.

2. Installations constituées d'éléments séparés

Elles sont constituées d'éléments séparés (réservoir de dosage, bande transporteuse vers le malaxeur, malaxeur, bande transporteuse de produit malaxé, silo, éventuellement système de pesage de l'agent de traitement, système de contrôle) qui peuvent être rapidement démontés et remontés.

Ces installations peuvent éventuellement aussi être utilisées pour le malaxage d'autres matériaux. Selon le type de malaxeur, on peut livrer des installations avec un rendement de 50 à 300 m^3/h.



Figure 42 *Exemples d'installations constituées d'éléments séparés*



Figure 43 Exemple d'installation de traitement réalisant le malaxage du sol avec l'agent de traitement dans un tamis rotatif



Figure 44 Tamis rotatif

Remarque

- Tamis rotatif

Ces systèmes sont composés d'un tamis rotatif et d'un (ou plusieurs) silo(s). Les tamis rotatifs sont des cribles présentant la caractéristique de tourner sur eux-mêmes. Ils sont destinés à séparer des matériaux en plusieurs fractions granulaires. Ils peuvent également être utilisés pour mélanger un sol à un agent de traitement.

Principe

Le sol est transporté du chantier jusqu'à la zone de stockage et pesé. La quantité désirée d'additif à ajouter (déterminée par pesée) est ensuite épandue sur le sol à traiter. Le malaxage en tant que tel du mélange sol-agent de traitement est ensuite exécuté par le tamis rotatif. Un prémalaxage du sol avec l'agent de traitement par une chargeuse à pneus permet d'améliorer la qualité du mélange. L'avantage de ce type d'installation est qu'elle permet d'éliminer les pierres de gros calibres (les mailles du cribles permettent d'exclure, par ce procédé, les pierres de dimension > 20 mm). Cette technique présente l'inconvénient d'engendrer une forte émission de poussière.





Figure 45 Exemples d'installations fixes de traitement des sols

III.2.3.4.b Installations fixes

Il s'agit d'une approche industrielle du traitement des sols. Les installations fixes de traitement s'attachent spécifiquement à faire des sols traités un produit aux caractéristiques bien définies dont la variabilité est sous contrôle.

Dans ces installations, les terres sont criblées, éventuellement broyées et malaxées avec le produit de traitement.

La production des terres traitées peut également être combinée à d'autres activités comme la production de matériaux de recyclage.

III.3 Planche d'essai (réf. 35, 44)

Pour les grands chantiers ou s'il y a des doutes quant au comportement des matériaux ou que le matériel de malaxage est mal connu, il est recommandé de réaliser une planche d'essai sur chantier avant le démarrage des travaux, et ce pour chaque changement de type de sol.

Les planches d'essai permettent de vérifier en vraie grandeur la faisabilité du traitement et de vérifier les conclusions des analyses de laboratoire; elles permettent de:

- vérifier in situ le bon fonctionnement et l'efficacité des machines (épandeurs, malaxeurs, compacteurs);
- définir les modalités de mise en œuvre (vitesse, profondeur optimale des outils, nombre de passes, etc.);
- ajuster éventuellement les dosages déterminés par les études de laboratoire en fonction des conditions de chantier;
- mettre en évidence les éventuels imprévus que l'on peut rencontrer sur chantier.

La longueur de travail est généralement de l'ordre de 50 m et la largeur couvre au moins trois passes de l'engin d'épandage.

A partir des mesures réalisées sur planche d'essai, on détermine de nouveaux graphiques donnant les dosages effectifs à utiliser en fonction de la teneur en eau naturelle du sol et des conditions climatiques.

III.4 Stockage du sol traité

Le mode de stockage du sol traité revêt une grande importance: même traité, un sol peut encore changer de consistance en cas d'apport d'eau, ce qui peut le rendre inutilisable.

III.4.1 Sols traités à la chaux

Un sol amélioré non compacté peut facilement rester plusieurs jours, voire plus plusieurs semaines en stock, pour autant qu'il soit protégé des précipitations. Dans ce cas, les sols traités doivent être correctement stockés: ils doivent être regroupés en un seul tas de façon à ce que la majorité de l'eau de pluie ruisselle sans pénétrer dans le tas. L'eau de ruissellement doit cependant être bien évacuée.

Si le mélange sol-chaux doit être stocké pour une longue durée, il est préférable de traiter le sol avec une faible dose de chaux (~ 1 %) afin de faciliter la manutention du sol. Le dosage sera éventuellement ajusté ultérieurement au moment de la réutilisation du sol selon l'application envisagée.

III.4.2 Sols traités au ciment

Un sol traité avec du ciment ne peut être stocké. Le sol traité doit être compacté immédiatement après l'incorporation du liant (le compactage doit être réalisé dans les 2 h qui suivent le malaxage).

III.4.3 Sols traités au liant hydraulique routier

Dans le cas d'une **amélioration** pour laquelle les dosages restent limités, les recommandations émises pour le sol traité à la chaux restent d'application. Il est néanmoins conseillé de vérifier auprès du producteur si le LHR utilisé permet le stockage du sol traité avec conservation des caractéristiques acquises par le traitement.

Dans le cas d'une **stabilisation**, les recommandations émises pour le ciment restent d'application.

III.5 Ventilation

III.5.1 Sols traités à la chaux

En raison de l'action de déshydratation de la chaux, les couches de sol humides traitées à la chaux peuvent être laissées exposées à l'air avant d'être compactées aussi longtemps que le cycle des opérations et les circonstances atmosphériques le permettent (en cas de menace de pluie, le mélange doit cependant être compacté rapidement et sa surface doit être lissée pour limiter l'humidification par la pluie). On compacte au plus tard en fin de journée pour éviter tout risque d'imbibition par les eaux de pluie et pour profiter du début des effets à long terme du traitement. En outre, l'évaporation pendant la nuit est relativement faible.

III.5.2 Sols traités au ciment

Le faible délai de maniabilité des ciments impose que les couches de sol traitées soient compactées dans les 2 h qui suivent le malaxage, le matériau ne peut rester exposé à l'air.

III.5.3 Sols traités au liant hydraulique routier

Un délai entre le malaxage et le compactage peut être bénéfique pour profiter d'un temps sec d'aération. Le délai de maniabilité est néanmoins à vérifier auprès du producteur. Pour les liants hydrauliques routiers à prise rapide, les recommandations relatives au ciment restent d'application.

III.6 Compactage

Ce chapitre ne reprend que les principes généraux du compactage. Pour plus d'informations sur les spécifications à respecter, nous renvoyons le lecteur aux cahiers des charges spécifiques existants.

III.6.1 But

On cherche à obtenir sur le chantier, après un certain nombre de passes de différents engins, une densité sèche en place le plus souvent comprise entre 95 et 100 % de la densité trouvée en laboratoire:

$$T = \frac{\rho_d}{\rho_{d\ \text{OPN (ou OPM)}}} \times 100$$

T = taux de compacité (%);
ρ_d = densité sèche du sol (g/m^3)
($\rho_{d\ OPN}$ = densité sèche du sol à l'optimum Proctor normal et
$\rho_{d\ OPM}$ = densité sèche à l'optimum Proctor modifié).

En général, le taux de compactage par comparaison à l'optimum Proctor normal doit être > 95 % en remblai et ≥ 98 % en fond de coffre.

III.6.2 Principes généraux

Le compactage des matériaux traités suit leur régalage par des engins à lame (bulldozer, niveleuse) en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs et le domaine d'application. Les compacteurs utilisés sont à pneus, vibrants ou à pieds dameurs.

Le compactage des sols traités, notamment dans les fonds de coffre et fondations/sous-fondations, doit être particulièrement soigné. Cela implique la mise en œuvre d'une énergie de compactage élevée.

Le compactage peut être contrôlé par une mesure de densité (densitomètres ou gammadensimètres). La portance de la couche compactée est contrôlée par l'essai à la plaque ou la sonde de battage.

III.6.3 Précautions particulières

L'utilisation de rouleaux vibrants peut provoquer un feuilletage superficiel sur des sols fins traités. Ce phénomène peut créer une discontinuité verticale. On atténue le phénomène en limitant les interventions des cylindres vibrants à ces niveaux et surtout en veillant au maintien de l'humidité du sol lors du compactage. Des mesures complémentaires doivent être prises lors du réglage (réf. 35).







Figure 46 Compacteurs

III.7 Réglage et protection des couches stabilisées

III.7.1 Réglage

Le réglage définitif des couches stabilisées (sous-fondations, fondations de voiries à faible trafic, couches support de fondation pour plates-formes industrielles) se fait par rabotage sur toute la surface à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Le rabotage permet en outre de réduire l'évacuation de la partie superficielle feuilletée éventuellement produite lors du compactage au cylindre vibrant.

Cette opération doit suivre immédiatement le compactage sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau traité.

Elle se fait le plus souvent à la niveleuse, éventuellement guidée (fil ou laser) ou bien, sur les chantiers importants, à la raboteuse guidée.

Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués (par scraper élévateur par exemple sur les gros chantiers).

III.7.2 Protection

III.7.2.1 Traitement au ciment ou LHR

Il est d'usage de respecter un délai d'au moins 7 jours entre la fin du traitement et la mise en service d'une plate-forme stabilisée au ciment ou LHR pour lui permettre d'atteindre un niveau de performance acceptable.

Certaines plates-formes supportent ensuite un trafic de chantier de longue durée avec parfois des intempéries sévères (cas des fonds de coffre devant passer un hiver). Il convient dans ces conditions de protéger la plate-forme contre les effets des intempéries (humidification, assèchement) et du trafic. Cette protection permet d'éviter des problèmes de fissuration qui peuvent apparaître dans ces couches.

La protection contre la dessiccation des matériaux traités au ciment ou LHR s'effectue en deux phases:

- la première phase consiste en un arrosage modéré à l'eau (sans ruissellement) de la surface du matériau traité; cet arrosage s'effectue immédiatement après le dernier passage du ou des engins de compactage;

- la seconde phase s'effectue au plus tard en fin de journée; elle consiste en l'application:
  - d'une émulsion de bitume C60B1, à raison de 0,7 l/m^2;
  - d'un épandage de sable (sable C.3.4.2, selon le RW99), à raison de 3 kg/m^2.

III.7.2.2 Traitement à la chaux

Si pour des raisons d'organisation de chantier ou de conditions climatologiques, il n'est pas possible de poursuivre immédiatement les travaux de couches complémentaires de la structure routière, la surface du sol traité à la chaux doit être protégée contre les effets de l'humidification et d'assèchement. La protection consiste en l'application, au plus tard en fin de journée, d'une émulsion de bitume à raison de 0,7 l/m^2, suivie éventuellement d'un sablage (sable C.3.4.2, selon le RW99) à raison de 3 kg/m^2.



Figure 47 Exemple de protection des sols traités

III.8 Délais d'exécution

Les délais à respecter pour atteindre les objectifs visés par le traitement varient en fonction de l'additif utilisé et du type de traitement appliqué:

- **amélioration à la chaux**: ce traitement permet aux sols d'acquérir immédiatement l'amélioration de leurs propriétés géotechniques (portance, résistance à la pénétration, aptitude au compactage);
- **amélioration aux liants hydrauliques routiers**: ce traitement permet aux sols d'acquérir rapidement (mais pas instantanément) l'amélioration de leurs propriétés géotechniques (portance, résistance à la pénétration, aptitude au compactage);
- **stabilisation des sols à la chaux**: les réactions à long terme entre la chaux et les minéraux argileux sont lentes à température ordinaire. Ainsi, dans nos régions, un mélange sol-chaux n'aura pas encore acquis pleinement sa stabilité au gel au seuil du premier hiver qui suit sa mise en œuvre. Il faut éviter qu'une période de gel suive le traitement à la chaux, ce qui pourrait diminuer les caractéristiques du sol stabilisé. Il est donc nécessaire de réaliser le traitement quelques mois avant l'apparition du gel (au printemps ou en été), avec des dosages suffisants en chaux. La résistance au gel du sol traité sera néanmoins vérifiée en laboratoire par les tests adéquats;
- **stabilisation des sols aux liants hydrauliques**: la vitesse de réaction des liants hydrauliques avec le sol permet au sol traité d'atteindre rapidement les exigences de résistance au gel (de l'ordre de quelques semaines selon la température ambiante et la classe de ciment ou type LHR utilisé). La résistance au gel du sol traité sera néanmoins vérifiée en laboratoire par les tests adéquats.

III.9 Précautions élémentaires

Un aspect important à considérer lors de l'exécution des traitements de sols est la protection du personnel d'exécution et des riverains vis-à-vis des risques et des nuisances causés par les poussières de l'agent de traitement. Les émissions de poussière d'agent de traitement peuvent, en effet, provoquer des irritations oculaires ainsi que des irritations des voies respiratoires et de la peau.

L'importance des émissions de poussières dépend du matériel utilisé, des conditions atmosphériques et des techniques d'exécution. L'impact est plus ou moins important selon la localisation du chantier (pour les chantiers implantés à proximité d'habitations ou de voiries très fréquentées, ce type de nuisance est plus gênant qu'en plein champ).

III.9.1 Mesures préventives

Les sources d'émission de poussières possibles ainsi que les mesures de base à mettre en œuvre pour limiter l'émission de poussières sont décrites dans le tableau 6 ci-contre.

III.9.2 Mesures protectrices pour le personnel de chantier

Les personnes qui sont généralement les plus exposées aux irritations sont les personnes qui manutentionnent les sacs d'agents de traitement ou qui manœuvrent les appareils de stockage et d'épandage. Pour protéger le personnel, il convient d'observer rigoureusement les précautions suivantes:

- les tracteurs des épandeuses et les malaxeurs automoteurs doivent être équipés de cabines fermées et si possible pressurisées;
- un stock d'eau claire doit être prévu sur chantier pour pouvoir rincer les yeux et la peau le cas échéant;
- afin d'éviter brûlures et irritations, les opérateurs d'engins et les ouvriers piétons doivent observer les précautions suivantes:
  - porter des vêtements protecteurs (chemise à manches longues, gants, etc.) ainsi que des chaussures montantes ou des bottes. En outre, il faut porter en permanence, durant la manutention de l'agent de traitement, des lunettes de sécurité avec entourage latéral. Si l'additif utilisé est de la chaux, les opérateurs doivent éviter de porter des vêtements étroitement serrés au cou ou aux poignets (un contact prolongé avec la peau en transpiration aux endroits où les vêtements sont trop serrés peut entraîner des irritations) et faire attention aux brûlures aux pieds (la température dans un sol humide, fraîchement traité à la chaux vive peut monter au-delà de 80 °C);
  - porter un léger masque filtrant quand l'atmosphère de travail est chargée de poussières d'agent de traitement (vidange des camions-citernes dans les silos de stockage, dans les épandeurs et chargement des épandeurs à partir des silos).

III.9.3 Premiers secours

III.9.3.1 Chaux

- *Brûlures de la peau*: laver complètement à l'eau tiède et au savon pour enlever toute trace de chaux, appliquer une pommade contre les brûlures et recouvrir d'un pansement stérilisé;

- *Chaux dans les yeux*: maintenir l'oeil ouvert et rincer à grande eau immédiatement et signaler aussitôt toute brûlure par la chaux dans les yeux pour que la surveillance médicale soit assurée sans retard.

III.9.3.1 Liant hydraulique

- *Liant hydraulique dans les yeux*: rincer immédiatement l'oeil à grande eau en maintenant les paupières séparées pendant plusieurs minutes. Eventuellement consulter un ophtalmologue;

- *Contact avec la peau*: retirer le plus de liant hydraulique possible et laver complètement à l'eau pour enlever toute trace du produit (faire attention aux particules qui restent entre la peau et les ongles, sous la montre ou dans les vêtements, chaussures, etc.);

Phase d'exécution	Matériel/ installation en cause	Sources d'émission de poussières	Solutions possibles
Transport et stockage	Porteurs	Amas de produit laissés sur le porteur à la fin du remplissage	Passage de chaque porteur dans une installation de dépoussiérage avant départ de l'usine
		Purge de la citerne	Aménagement de zones spécialement équipées pour cette pratique Sanctions diverses pour les cas où des purges seraient faites en dehors de ces zones
	Silos	Rejets de produit par les évents du silo durant le remplissage	Raccordement des évents des silos à des filtres en bon état
		Excès de remplissage du silo	Mise en place sur les silos d'un dispositif de contrôle du remplissage et d'alerte en fin d'opération
	Organes de transvasement	Fuites aux raccords et/ou éclatement des manchons	Entretien régulier de l'installation et intervention directe en cas de défaut
	Aire de stockage	Accumulation de produit par suite de pertes ou fuites accidentelles	Élimination systématique de toute accumulation de produit
Épandage	Epandeurs	Rejets de produit par les évents de l'épandeur durant le remplissage	Raccordement des évents des silos à des filtres en bon état
		Excès de remplissage de l'épandeur	Mise en place d'un dispositif de contrôle de remplissage
		Fuites aux raccords et/ou éclatement des manchons	Entretien régulier de l'installation et intervention directe en cas de défaut
		Hauteur de chute du produit trop importante	Réduction de la hauteur de chute du produit limitée à 0,5 maximum Canalisation du produit durant sa chute par des jupes souples en bon état jusqu'à 5 à 10 cm du sol
		Défaut d'étanchéité notamment en fin de vidange dans le cas d'épandeur à fluidisation ou à éjection pneumatique	Placer un système de protection qui indique la fin de la vidange
		Passage de l'épandeur sur une surface déjà recouverte par le produit de traitement	Epandre en un seul passage la totalité de la masse de produit requise
		Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement	Orientation de l'échappement afin de recevoir un courant ascendant ponctuel Epandeur réalisant simultanément épandage et malaxage du produit avec le sol
Malaxage	Charrues et autres engins de malaxage à outils fixes tractés	Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement du tracteur	Orientation de l'échappement afin de recevoir un courant ascendant ponctuel Epandeur réalisant simultanément épandage et malaxage du produit avec le sol
		Turbulences provoquées par les patins des chenilles ou les disques des charrues	Adapter les vitesses de travail des engins de traction aux conditions atmosphériques (vent)
	Pulvérisateurs de sols à arbre horizontal	Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement	Orientation de l'échappement afin de recevoir un courant ascendant ponctuel Épandeur réalisant simultanément épandage et malaxage du produit avec le sol
		Mauvais réglage de l'ouverture des trappes de la chambre de malaxage	Corriger le réglage et l'adapter à la nature et à l'état du sol Former le conducteur
	Vent	Présence de vent provoquant la formation et l'entraînement de poussières	Arrêt du traitement et surtout de l'épandage dès que l'entraînement des poussières dépasse les limites acceptables pour le chantier Utilisation d'un additif à faible capacité d'envol
	Véhicules	Circulation de véhicules (y compris voitures légères) sur une surface recouverte de produit	Interdire toute circulation sur une surface recouverte
	Coordination des différentes machines	Surface recouverte de produit	Réaliser une coordination entre les ateliers d'épandage et de malaxage pour que le délai soit de préférence de 15 à 30 minutes

Tableau 6 Sources d'émission de poussières possibles et solutions à apporter (réf. 8)

- *Inhalation de liant hydraulique*: faire prendre l'air frais à la victime (la transporter en dehors de la zone d'émission de poussière). Eventuellement consulter un médecin;

- *Ingestion*: rincer abondamment la bouche avec de l'eau et boire beaucoup d'eau/lait. Ne pas vomir. Eventuellement consulter un médecin.

III.9.4 Chantiers sensibles

Pour définir un chantier sensible, on peut utiliser la notion suivante: un chantier se trouvant à moins de 100 à 150 m d'habitations, d'installations industrielles, d'artères importantes, d'une voie ferrée électrifiée, de zones d'horticulture, de cultures maraîchères, d'arbres fruitiers (surtout en période de floraison), de fourrages, de parkings ou d'entrepôts de produits sensibles.

Sur ces chantiers, on doit au moins respecter les précautions stipulées. En fonction du degré de sensibilité du chantier, un certain nombre d'exigences supplémentaires peuvent être ajoutées au cahier des charges.

La liste suivante est une ébauche non exhaustive.

III.9.4.1 Stipulations concernant les produits de traitement, leur stockage et leur transvasement

1. Utilisation d'un produit de traitement à faible capacité d'envol.
2. Installation d'un dispositif spécifique permettant de réduire toute émission de poussières durant le transvasement comme par exemple une tente au-dessus de la zone de chargement, etc.

III.9.4.2 Stipulations concernant l'épandage

1. Interruption de l'épandage dès que le vent transporte l'agent de traitement en dehors du chantier. Il s'agit de poussières du produit de traitement et pas de poussières de sol ou de poussières dues aux dégagements de vapeur d'eau.
2. Equipement de l'épandeur d'un dispositif rabattant les poussières émises au moment de la chute de l'agent de traitement (aspiration, rampe de brumisation, etc.).
3. Déviation des gaz d'échappement du matériel.

III.9.4.3 Stipulations concernant le malaxage

1. Interruption du malaxage pour les mêmes conditions que celles fixées pour l'épandage.
2. Procéder au malaxage dans un délai de 15 minutes au maximum après l'épandage.
3. Déviation des gaz d'échappement du matériel.
4. Prescription du malaxage exclusivement à l'aide de pulvérisateurs à arbre horizontal et à chambre de malaxage.
5. Obligation de traiter les sols dans une centrale.

III.9.4.1 Stipulations concernant la mise en place de moyens de mesure des émissions de poussières

1. Installation d'un anémomètre sur le chantier.
2. Installation de capteurs - enregistreurs de poussières et relevés de leurs indications.

III.10 Aspects économiques (réf. 11, 35)

Chaque chantier est un cas particulier et il convient d'évaluer la compétitivité du traitement vis-à-vis de techniques plus traditionnelles (reposant sur l'emploi de matériaux d'emprunt) grâce à un bilan comparatif. Les **différentes composantes de ce bilan** sont:

- pour la **solution traitement**: coût de la fourniture de l'agent de traitement, de son transport et des manipulations (stockage, épandage, malaxage, compactage), coûts indirects (émission de poussière, bruit, etc.);
- pour la **solution emprunt**: frais d'évacuation, frais de chargement, achat et transport des matériaux d'apport, mise en œuvre (réglage et compactage), coûts indirects (usure de la voirie par le trafic de chantier pour emprunt/dépôt, bruit, coûts d'augmentation des délais d'exécution si les conditions climatiques sont défavorables, etc.).

Les **avantages économiques**, directs et indirects, du traitement sont importants:

- **Réutilisation des sols** au lieu d'utiliser des matériaux d'emprunt, dont les ressources sont de plus en plus limitées. L'impact sur l'environnement se situe à plusieurs niveaux:

  - pas de mise en décharge, limitation des emprunts;
  - meilleure gestion des ressources naturelles;
  - diminution du trafic routier vers le chantier et ainsi des dégâts qui y sont liés;
  - exploitation rationnelle des terrains en zone périurbaine.

- **Amélioration de la productivité**: le traitement permet de faciliter la circulation des engins sur chantier et de limiter les temps d'arrêt pour cause d'intempéries, ce qui entraîne:

  - une diminution des coûts de chantier;
  - un meilleur respect des délais d'exécution;
  - une augmentation de la rentabilité des ouvrages mis en service plus tôt.

- Techniques permettant d'atteindre un **niveau de qualité** requis pour la construction de remblais, la réalisation de fonds de coffre et couches d'assises de chaussées:

  - l'amélioration des matériaux permet de réduire les quantités mises en œuvre;
  - la durée de vie des structures est augmentée;
  - les coûts d'entretien sont diminués.

Eléments pratiques influençant les **coûts** de traitement:

- L'**agent de traitement**:
  - en cours d'étude, le dosage de l'agent de traitement est déterminé en fonction du domaine d'application et des teneurs en eau estimées;
  - lors de l'exécution du chantier: la détermination de l'humidité des sols permet de mieux ajuster les dosages.

- **Préparation des sols**: une scarification préalable des sols compacts et argileux permet d'augmenter les rendements du malaxage.

- **Stockage - Epandage**: l'aire de stockage doit être située à proximité du lieu de traitement afin de limiter les frais de transport. Un épandeur précis permet de réaliser des économies appréciables en évitant des surdosages éventuels pénalisants pour la technique.

- **Malaxage**: la qualité du malaxage dépend de l'application envisagée:

  - pour une couche de chaussée, un fond de coffre ou une arase-terrassement, le malaxage sera particulièrement soigné;
  - le corps de remblai peut se contenter d'un malaxage moins poussé.



Annexe A
Les sols

A.1 Introduction

Cette annexe est destinée aux personnes désirant avoir plus d'informations sur les sols et leur comportement. Elle reprend, de manière succincte, les concepts de base de la mécanique des sols qui sont nécessaires à une bonne compréhension des processus de traitement des sols décrits dans cet ouvrage. Le lecteur qui désire plus de détails est invité à consulter les multiples manuels de mécanique des sols existant sur le marché.

A.2 Qu'est-ce un sol?

Les ouvrages de mécanique des sols utilisent le terme sol pour décrire les matériaux détachés ou fragmentaires qui se trouvent dans la croûte terrestre. Le sol est donc beaucoup plus que la fine couche de terre arable dont on parle en agriculture. Il englobe tous les matériaux que l'on trouve dans la terre, qu'il s'agisse de roches ou de matériaux meubles ou cohérents.

Si l'on effectue une coupe dans un sol, on distinguera plusieurs couches différentes:

- partie supérieure: sol organique (terre végétale riche en matières organiques, formée par la décomposition de la végétation);
- partie intermédiaire: différents horizons de sols de différentes natures;
- partie inférieure: roche mère.

L'étude des sols se différencie fortement de l'étude des fluides et de l'étude des solides. En effet, le sol est un matériau particulaire: les grains du sol ne sont pas liés entre eux comme le sont les particules d'un cristal. Ils peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres mais ils se déplacent moins facilement que les éléments d'un fluide.

A.3 Les familles de sols

Les sols résultent de l'altération des roches suite à un ensemble de phénomènes complexes (altération mécanique, physique, chimique). La nature du sol dépend de la roche qui lui a donné naissance mais aussi de la végétation et du climat. Il existe une grande variété de sols. On peut les regrouper en «sols types» comme les sols rocheux, sableux, limoneux, argileux, voire un mélange de ces différents types (sols sablo-limoneux, limono-argileux, etc.). Les différents types de sols diffèrent de par leur comportement. C'est pourquoi chaque sol possède ses propres exigences et demande des contrôles spécifiques si on veut l'utiliser dans des ouvrages.

En Belgique, on distingue trois grandes familles de sols: les sables, les limons et les argiles. Il faut toutefois garder à l'esprit que les sols que l'on rencontre dans la nature consistent généralement en une combinaison de ces différentes familles.

Les caractéristiques de ces trois familles sont reprises ci-dessous.

A.3.1 Les argiles

Les argiles sont des sols très fins (particules inférieures à 2 µm) dont le comportement est fortement influencé par leur teneur en eau et leur structure cristalline de base.

Ces sols sont cohésifs, compressibles, très difficiles à manipuler et à compacter et parfois gonflants. Ils sont très peu perméables, ce qui rend la variation de leur teneur en eau très lente. Dans les sols argileux, les dégâts causés par le gel peuvent être importants. On dit donc qu'ils sont gélifs.

Les minéraux argileux sont des silicates d'aluminium hydratés. Les types les plus fréquents sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite.

Les grains ont la forme de plaquettes plus ou moins longues voire de bâtonnets et ne peuvent être vus à l'œil nu. Leurs dimensions doivent dès lors être déterminées en laboratoire. Une caractéristique des particules d'argile est qu'elles s'attirent les unes les autres et se regroupent. L'ensemble des forces d'attraction qui unissent les particules d'argile est appelé la cohésion, qui est une grandeur caractéristique pour une argile.

Cette cohésion explique que les sols argileux sont des sols très cohérents à forte plasticité. Les argiles sont facilement déformables sous l'effet de l'addition d'une faible quantité d'eau, même sous des charges faibles. Elles gardent ensuite la forme qu'on leur a donnée.

Ces propriétés tout à fait spécifiques de plasticité, déformabilité, moulabilité font que, dans certaines conditions d'humidité, l'argile devient plastique et il est possible de la façonner (ce qui est impossible avec un sable). Cette propriété est exploitée pour la fabrication de poteries, de briques, etc.

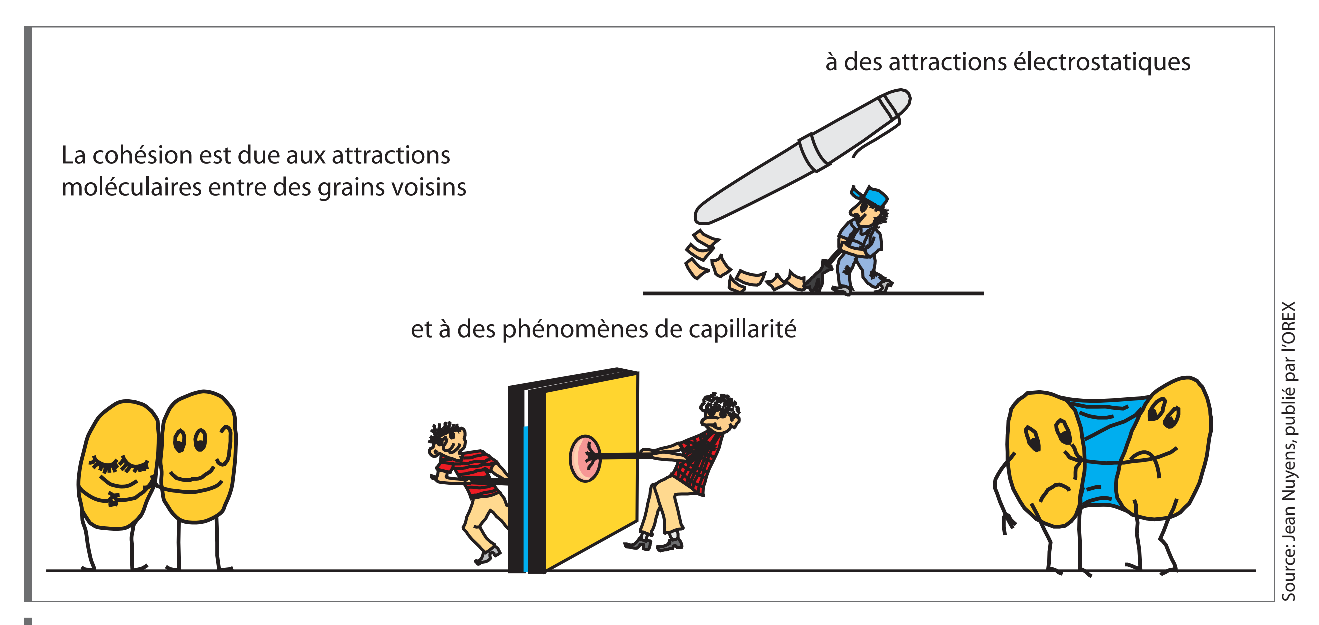


Figure A1.1 Cohésion

A.3.2 Les limons

Les limons sont des sols fins plus ou moins plastiques qui peuvent changer brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau. Ils sont formés de particules plus grosses que celles que l'on trouve dans les argiles (entre 2 et 20 µm). Leurs grains sont le résultat de la désagrégation mécanique ou physique des roches dont ils gardent la structure. Bien qu'à l'œil nu on ne puisse distinguer un limon d'une argile, leurs propriétés physiques diffèrent fortement. Les limons sont assez instables et difficiles à travailler lorsque leur teneur en eau augmente. Ce sont des sols à plasticité moyenne, moins cohérents que les argiles.

Ils sèchent plus rapidement que les sols argileux. Ils sont moins perméables que les sols sableux. Les limons peuvent être déformés sous des charges modérées pour de faibles variations de la teneur en eau. Comme les sols argileux, les limons sont des sols gélifs.

A.3.3 Les sables

Les sables sont constitués de particules visibles à l'oeil nu. D'une manière générale, le diamètre des grains est compris entre 20 µm et 2 mm. La forme des grains est généralement plus ou moins équidimensionnelle. La forme des grains peut varier de manière considérable: ils peuvent être roulés, arrondis ou anguleux. Les courbes granulométriques des sables peuvent être très variées.

Les sables sont des matériaux non plastiques et non cohérents. Ils sont peu ou pas sensibles aux variations de teneur en eau. Que le sable soit sec, humide ou saturé d'eau, ses caractéristiques géotechniques ne changent pas de manière significative. Ceci tient du fait qu'un sable possède des pores de grande dimension où l'eau peut relativement facilement circuler.

Les propriétés d'un sable dépendent donc en grande partie de la dimension et de la forme des grains solides et de leur état de compacité. Les sols sableux sont des sols bien aérés, faciles à travailler et peu gélifs. Ces sols se compactent assez facilement et restent stables une fois compactés. Les sables sont peu/pas déformables sous l'action d'une force appliquée à leur surface.

A.3.4 Tableau de synthèse des caractéristiques

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques des sols.

Sol	Perméabilité	Portance	Tassements	Caractère expansif	Compactage
Sable	Moyenne	Bonne	Non	Non	Facile
Limon	Moyenne-faible	Faible	Oui	Parfois	Peut être difficile à compacter
Argile	Très faible	Moyenne	Oui	Oui	Très difficile
Graviers	Très haute	Excellente	Non	Non	Très facile

Tableau A1.1 *Tableau de synthèse des caractéristiques des sols*

A.4 La composition d'un sol

A.4.1 Introduction

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène, d'origine minérale et organique et est constitué de grains et de pores. Le sol est donc un matériau à trois phases: phase solide (squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol:

A.4.1.1 Les grains

Les grains dérivent de rochers massifs et forment le squelette du sol. Ils sont caractérisés par:

- *leur taille*: c'est pour estimer la quantité des grains d'une taille définie que l'on détermine la granulométrie – cf. chapitre I.3.1.1 *Granulométrie* – qui fournit des informations sur le comportement du sol;
- *leur forme*: la forme des grains (cubique, sphérique, plaquettes, etc.) et leur état de surface (rugueux, poli, etc.) ont une influence directe sur le comportement du sol. D'une manière générale, l'irrégularité des grains augmente la stabilité;
- *la nature des minéraux qui les composent*: la nature des particules d'un sol a une influence sur certains paramètres du sol (perméabilité, compressibilité, résistance, transmission des forces), spécialement dans les sols fins. Certains minéraux peuvent conférer des propriétés inhabituelles au sol (certaines argiles – telles les montmorillonites – peuvent rendre les sols expansifs).

A.4.1.2 Les pores

Entre les différentes particules de sols se trouvent ce que l'on appelle communément des «vides». Ce terme est pourtant mal choisi puisque ces «vides» ne sont en fait pas vides mais contiennent de l'air et/ou de l'eau. C'est la raison pour laquelle le terme «pores» est mieux adapté dans ce cas-ci. La teneur en pores peut être plus ou moins

importante selon la granulométrie, la forme et la distribution des grains, et la compacité du sol. Leur présence est facile à visualiser dans les sables et graviers mais elle l'est moins dans les argiles ou limons où les pores sont beaucoup plus petits. Lorsque le sol est sec, les pores sont remplis d'air. Lorsque, à l'opposé, les pores sont complètement remplis d'eau, on dit que le sol est saturé.

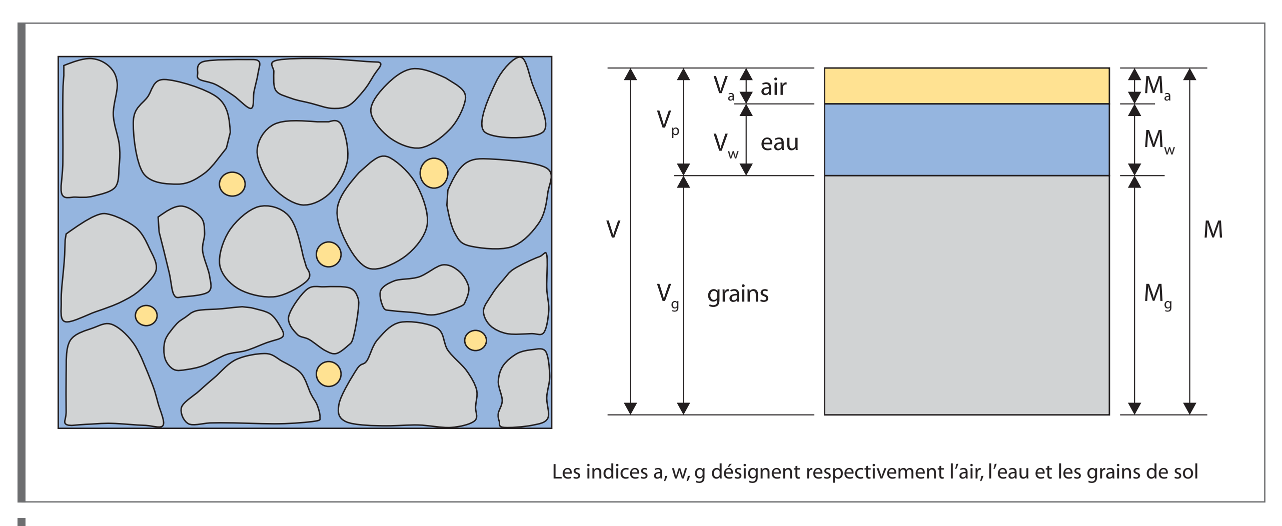


Figure A1.2 *Composition d'un sol*

A.4.2 Définition de quelques grandeurs caractéristiques

A.4.2.1 Grandeurs de base

Afin de pouvoir caractériser les sols, on a défini, en mécanique des sols, plusieurs grandeurs caractéristiques. On peut, en première instance, schématiser les trois composants du sol au point de vue poids. On a:

$$W = W_g + W_w + W_a$$

W = le poids total du sol;
W_g = le poids des grains;
W_w = le poids de l'eau;
W_a = le poids de l'air (qui est négligeable).

On peut également schématiser les trois composants du sol au point de vue volume:

$$V_p = V_w + V_a \quad \text{et} \quad V = V_p + V_g$$

V = le volume total du sol;
V_p = le volume des pores;
V_a = le volume de l'air;
V_w = le volume de l'eau;
V_g = le volume des grains.

A partir de ces différentes grandeurs, on peut définir d'autres grandeurs susceptibles de caractériser la compacité du sol et son humidité. Elles seront qualifiées de paramètres de poids volumique.

A.4.2.2 Le poids volumique des particules solides

Le poids volumique des particules solides G vaut:

$$G = W_g / V_g$$

On le détermine à l'aide d'un pycnomètre. Cet essai assez simple est rarement exécuté. En effet, le poids volumique des sols courants varie très peu. Rapporté au poids volumique de l'eau (104 N/m^3), il prend les valeurs moyennes suivantes:

2,65 pour le quartz, c.-à-d. la plupart des sables;
2,70 pour la plupart des argiles.

A.4.2.3 Le poids volumique du sol

Le poids volumique du sol est égal à son poids W divisé par son volume V:

$$\gamma = W / V$$

Les valeurs courantes sont de l'ordre de 16 à 18 kN/m^3 pour les sols non saturés. Elles peuvent être inférieures à 14 pour des sols secs peu compacts et nettement supérieures à 20 kN/m^3 pour des sols compacts et humides, mais elles sont de l'ordre de 20 kN/m^3 pour des sols saturés moyennement compacts.

A.4.2.4 Teneur en eau

On définit la teneur en eau w, qui est en mécanique des sols une teneur en eau pondérale, de la façon suivante:

$$w = (W_w / W_g) \cdot 100$$

Elle est exprimée en pour cent. La teneur en eau peut avoir des valeurs allant de 0 % pour des sols totalement secs jusqu'à plus de 100 % pour des sols organiques saturés.

A.4.2.5 Poids volumique du sol sec

Un sol dans un certain état de compacité peut avoir différents poids volumiques selon sa teneur en eau. Il est maximum lorsque le sol est saturé. La valeur du poids volumique n'est donc pas une mesure de la compacité. Pour cette raison, lorsqu'on veut caractériser la compacité, on se sert du poids volumique du sol sec γ_d qui est la valeur de γ que le sol aurait si on pouvait le sécher sans qu'il change de volume. Le poids volumique sec γ_d est donc égal au poids des grains divisé par le volume total initial du sol.

$$\gamma_d = W_g / V$$

Il vaut également:

$$\gamma = \gamma_d \cdot (1 + w / 100)$$

C'est le poids volumique sec qui est utilisé dans la présentation des courbes Proctor.

A.4.2.6 La teneur en eau de saturation

Si tous les pores du sol sont pleins d'eau, le sol est saturé et la teneur en eau de saturation w_{sat} peut s'exprimer en fonction des autres grandeurs définies précédemment. Il suffit de poser que le volume des vides est occupé entièrement par l'eau et on a par conséquent:

$$w_{sat} = \gamma_w / \gamma_d - \gamma_w / G / . 100$$

A l'aide de cette formule, il est possible de calculer les courbes de saturation (γ_d en fonction de w). Ces courbes sont, dans certains cas, présentées sur les diagrammes Proctor, ce qui permet d'avoir facilement une idée visuelle du degré de saturation de l'échantillon.

A.4.2.7 Le degré de saturation

Le rapport de la teneur en eau naturelle w à la teneur en eau de saturation w_{sat} exprimé en pour cent est appelé degré de saturation S_r.

$$S_r = (w / w_{sat}) . 100$$

A.4.2.8 La porosité (également appelée pourcentage de vides)

La porosité n est le volume des vides rapporté au volume total et est exprimée généralement en pour cent.

$$n = (V_v / V) . 100$$

A.4.2.9 Indice de vides

L'indice de vides est égal au volume des vides rapporté au volume des grains. Il n'est généralement pas exprimé en pour cent.

$$e = V_v / V_g$$

A.4.2.10 La densité relative des sols sableux

On définit l'état de compacité d'un sol sableux à partir des valeurs minimales et maximales de l'indice de vides grâce à la notion de densité relative D_r.

$$D_r = (e_{max} - e_{naturel}) / (e_{max} - e_{min}) . 100$$

Le tableau ci-contre montre la correspondance entre la densité relative et la compacité des sols à caractère sableux.

Densité relative	Description
0 - 15	Très faible densité
15 - 35	Faible densité
35 - 65	Moyennement compact
65 - 85	Compact
85 - 100	Très compact

A.5 Le comportement du sol vis-à-vis de l'eau

La différenciation des sols par des critères dimensionnels est insuffisante pour caractériser leurs différences de comportement. A titre d'exemple, si on fabrique artificiellement un limon au point de vue granulométrique en broyant finement un sable composé exclusivement de silice, en tamisant à 63 µm et en récoltant le tamisat, on obtient un matériau qui satisfait à la définition granulométrique d'un limon mais qui a le comportement d'un sable fin.

L'eau joue un rôle essentiel dans le comportement des sols. Les propriétés du sol varient énormément selon l'importance respective des phases solide, liquide et gazeuse. Plus un sol contient de l'eau, moins il y aura d'attraction entre les particules du sol et plus le sol se présentera sous forme de «boue». Inversement, une dessiccation transformera le sol en un matériau solide. On peut ainsi avoir un mélange de sable, de limon et d'argile très dur lorsqu'il est sec et très mou lorsqu'il est humide, ce qui engendre de grandes difficultés sur un chantier. La seule différence entre ces deux états est le remplacement de l'air par l'eau dans les vides. En outre, l'eau contenue dans les pores du sol peut dans certains cas reprendre une partie des charges appliquées au sol, pendant un laps de temps fonction de la perméabilité du sol, et ainsi influencer le comportement du sol.

Les comportements extrêmes des sols peuvent être caractérisés d'une part par les sables composés de grains de silice aux formes massives et de dimensions relativement grandes comprises entre 60 µm et 2 mm et d'autre part par les argiles composées de particules de silicates aux formes anisodimensionelles, plaquettes ou bâtonnets, dont au moins une des dimensions n'est que de quelques dizaines d'Angströms.

Les sables ont une structure assez aérée avec des pores relativement grands. L'eau peut circuler assez facilement entre ces pores, est très peu adsorbée (c.-à-d. qu'il n'y a presque pas d'eau qui reste collée aux grains) et peut donc facilement être drainée. Ceci explique pourquoi les caractéristiques des sables sont peu influencées par la présence d'eau. Les argiles sont formées de plaquettes qui n'ont pas de charge électrique neutre. Elles attirent donc l'eau, qui est une molécule présentant également des pôles électriques. L'eau est donc fortement adsorbée par l'argile. Les pores entre les grains sont également très petits. Ces deux phénomènes expliquent pourquoi la teneur en eau des argiles ne change que très lentement. Les argiles sont très difficiles à drainer ou à sécher. Les paramètres les plus connus pour caractériser le comportement des argiles (et des limons) en fonction de leur teneur en eau, sont les limites d'Atterberg.

Le but des limites d'Atterberg est de mesurer l'aptitude de l'argile à être plus ou moins plastique. Le suédois Atterberg avait mis ces techniques au point pour l'industrie céramique. On conçoit qu'un sol puisse être solide, plastique ou liquide selon la quantité d'eau qu'il contient. Si l'on part d'une argile très humide dont le comportement est proche de celui d'un liquide, c.-à-.d. qui s'écoule sous son propre poids, et si on fait sécher cette argile progressivement, on passe de l'état liquide à l'état plastique et l'argile peut alors être modelée et garder sa forme. La teneur en eau définissant le passage de l'état liquide à l'état plastique est appelée limite de liquidité w_L. Si on continue à faire sécher l'argile, il arrive un moment où l'on passe de l'état plastique à l'état friable. La teneur en eau correspondante est appelée limite de plasticité w_P. La différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité est appelée indice de plasticité Ip et caractérise l'étendue du domaine où le comportement de l'argile est plastique.

A.6 Le compactage

A.6.1 Introduction

Le compactage est un procédé mécanique permettant d'augmenter la densité en place du sol. Le compactage permet de resserrer la texture du matériau, de réduire les possibilités de déformation et d'améliorer la capacité portante. Le compactage est donc un bon moyen de limiter les risques de tassements ultérieurs et donc les coûts de maintenance et les problèmes structuraux.

En compactant, nous essayons autant que possible de faire glisser les grains les uns entre les autres pour minimiser la phase gazeuse dans les pores et maximaliser les surfaces de contact entres ces grains. Ainsi les forces peuvent intégralement être reprises via le squelette granulaire raide. Dans les sables, il est relativement facile de réaliser ces contacts. Dans les argiles, par contre, il reste toujours un film très fin d'eau (épaisseur de cinq molécules, environ) entre les grains.

L'expérience montre que plus la granulométrie d'un sol est étalée (c'est-à-dire que toutes les tailles de particules du sol sont présentes), plus le sol est facile à compacter. En effet, dans ces conditions les particules fines peuvent, sous l'effet d'une charge, venir combler les vides formés par les particules plus grandes.

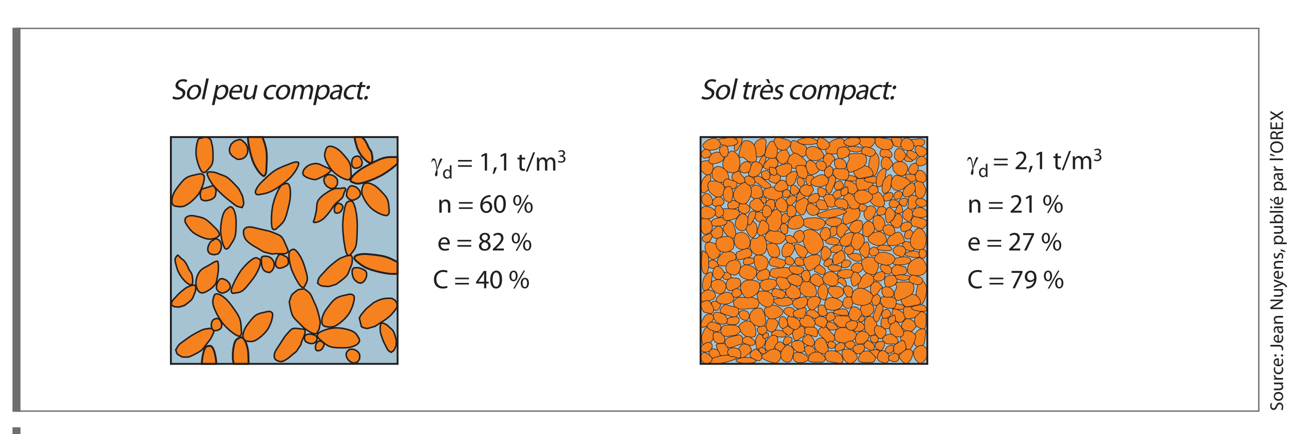


Figure A1.3 Le compactage

A.6.2 Teneur en eau et compactage

La teneur en eau du sol a un impact immédiat sur le compactage. En effet, les sols trop secs sont très difficiles à compacter. L'eau agit comme un lubrifiant dans le sol en permettant aux particules de glisser les unes sur les autres pour adopter une structure plus serrée. Une teneur en eau trop faible empêchera le mouvement des particules les unes par rapport aux autres, ce qui empêchera d'augmenter la densité. Plus le sol est sec, plus il est résistant au compactage.

Une teneur en eau trop élevée induira également à un mauvais compactage. En effet, lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau remplit les vides du sol et prend la place des grains solides; de plus, l'eau étant incompressible, elle absorbe une partie de l'énergie de compactage ce qui empêche les particules du sol d'adopter une structure plus dense.

Il existe ainsi, pour chaque sol, une teneur en eau optimale pour un compactage optimal (détermination de la teneur en eau optimale par l'essai Proctor, cf. chapitre I.3.3.1.c *Essais Proctor*).

A.6.3 Caractériser le compactage

Pour connaître la meilleure manière de compacter un matériau, il faut exécuter un essai Proctor. A l'aide de cet essai, on mesure la teneur optimale à laquelle on peut atteindre le poids volumique sec maximal. Sur chantier, on va tenter de s'approcher autant que possible de ces deux valeurs. Plusieurs essais permettent de mesurer la masse volumique in situ qui est alors comparée aux valeurs atteintes en laboratoire.

Comme ces méthodes de mesure sont parfois assez fastidieuses, on préfère dans beaucoup de cas mesurer autrement la qualité du compactage, par exemple à l'aide d'essais de chargement à la plaque.

A.7 Les tassements dans les sols

A.7.1 Mécanismes de tassement

Trois mécanismes différents jouent un rôle lors des tassements dans un sol:

1. Les grains se déforment sous l'influence des forces de contact. Parfois ils peuvent même se casser, si le matériau n'est pas résistant ou si les forces exercées sur le matériau deviennent trop grandes. Ces déformations provoquent l'agrandissement des surfaces de contact, ce qui permet au matériau de retrouver un nouvel équilibre (cf. figure A1.4a).

2. Les grains sous forme de plaquettes, éventuellement présents dans le matériau, peuvent fléchir et causer le déplacement des grains adjacents. C'est un phénomène typique pour les sols argileux puisqu'on ne trouve généralement pas ce type de grains dans les sables (cf. figure A1.4.b).

3. Au moment où la composante tangentielle d'une force devient supérieure à la résistance au cisaillement qui règne entre les grains, ceux-ci vont glisser les uns sur les autres. Ceci provoque également une déformation du massif de sol (cf. figure A1.4.c).

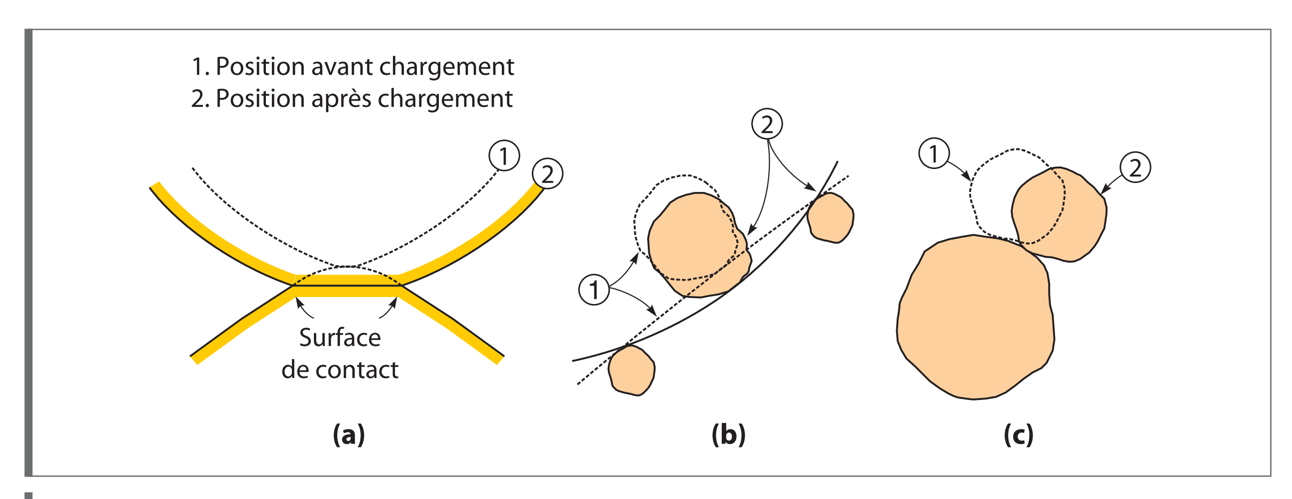


Figure A1.4 *Mécanismes de tassement*

Le tassement total est une combinaison de ces trois phénomènes mais le dernier mécanisme joue quand même le plus grand rôle. On voit donc que le tassement dans le sol trouve son origine dans les interactions entre les grains individuels, surtout par glissement ou roulement.

Il faut noter que le tassement provoque la diminution du volume des pores mais augmente en même temps les caractéristiques mécaniques du sol. En guise d'exemple, la figure A1.5 montre comment l'angle de frottement d'un sable fin augmente de manière notable quand le volume des pores diminue.

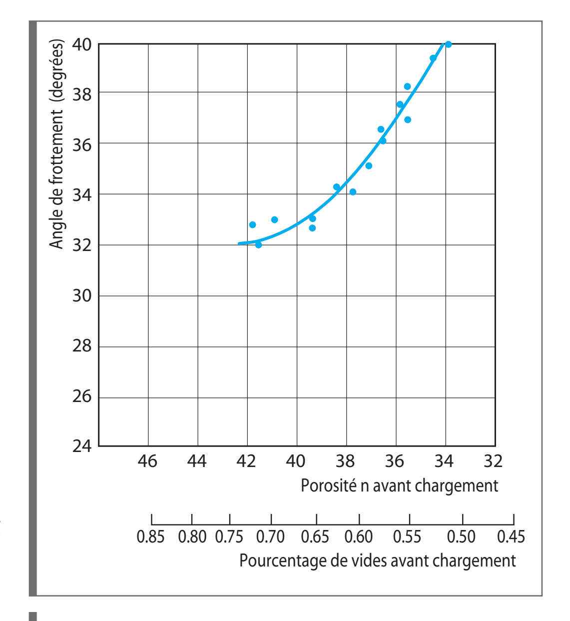


Figure A1.5
Augmentation de l'angle de frottement d'un sable en fonction de la diminution de la porosité

A.7.2 L'influence de l'eau sur les tassements

Les mécanismes décrits au chapitre A.7.1 sont également influencés par l'eau, de deux manières:

1. L'eau présente dans le sol forme un film autour des grains. Si les contraintes entre les grains sont peu élevées, il se peut même qu'il n'y ait plus du tout de contact direct entre certains grains. Ce phénomène diminue le frottement entre les grains et favorise donc le tassement du sol. L'eau joue donc un rôle de lubrifiant et aura une influence négative sur l'angle de frottement du sol. Ceci mène à une perte de capacité portante du sol.

2. Si un sol fin est saturé d'eau, un accroissement des contraintes sur le sol ne provoque pas seulement une augmentation de la pression entre les grains. La pression de l'eau se trouvant dans les pores augmentera également à court terme. Ensuite cette pression se dissipera à une vitesse dépendant de la perméabilité du sol, pour atteindre un nouvel équilibre après quelques semaines, voire quelques mois. Ce phénomène est

appelé le tassement par consolidation du sol et il est très important d'en tenir compte lors de la construction de grands remblais. Lorsque le sous-sol contient des couches très compressibles, des tassements de plusieurs dizaines de centimètres sont à attendre.

Un sol peut également se tasser parce que le niveau de la nappe aquifère baisse (par exemple à cause de pompages dans les environs). Il s'agit ici également d'un phénomène de consolidation mais causé par des pompages.

A.7.3 Influence de la pénétration d'eau dans un sol initialement non saturé

Quand un sol est bien compacté, une entrée d'eau a posteriori (par exemple après enlèvement d'un rabattement de nappe sur chantier) n'implique pas automatiquement qu'il y ait des tassements. En effet, quand les grains sont déjà entassés de manière compacte, il reste peu de place pour des glissements entre eux, même si on «lubrifie» les surfaces de contact. Il s'ensuit que les tassements seront nuls ou négligeables. Si le compactage est moins bon, le sol pourra encore se tasser à ce moment-là.

Il se peut toujours que la pression d'eau augmente de telle façon qu'elle devienne supérieure à la pression effective entre les grains. A ce moment-là, le sol devient plus ou moins liquide et tout compactage est perdu. C'est un phénomène que l'on peut par exemple rencontrer dans des fouilles si la pression de la nappe aquifère est trop grande (phénomène du renard).

Liste des figures

Nous remercions les sociétés suivantes qui nous ont fourni les photos et qui nous autorisent à les présenter dans ce code de bonne pratique: Aswebo, AWS, Cloet, Damman-Croes, Febelcem, Geo-Milieu, Georoc, Holcim, Lhoist, Tradecowall, Van Broekhoven's.

Liste des tableaux

Normes

Normes ISO

ISO 11263 (1994)
Qualité du sol – Dosage du phosphore – Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

ISO/TS 14256-1 (2003)
Qualité du sol – Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans les sols bruts par extraction au moyen d'une solution de chlorure de potassium – Partie 1: Méthode manuelle.

ISO/TS 14256-2 (2005)
Qualité du sol – Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans des sols bruts par extraction avec une solution de chlorure de potassium – Partie 2: Méthode automatisée avec analyse en flux segmenté.

NBN CEN ISO/TS 17892 – 12 (2005)
Reconnaissance et essais géotechniques: essais de sol au laboratoire – Partie 12: détermination des limites d'Atterberg.

Normes européennes

NBN EN 196-1 (2005)
Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: Détermination des résistances mécaniques.

NBN EN 196-2 (2005)
Méthodes d'essais des ciments – Partie 2: Analyse chimique des ciments.

NBN EN 196-3 (2005)
Méthodes d'essais des ciments – Partie 3: Détermination des temps de prise et de la stabilité.

NBN EN 196-8 (2004)
Méthodes d'essai des ciments – Partie 8: Chaleur d'hydratation - Méthode par dissolution.

NBN EN 196-9 (2004)
Méthodes d'essai des ciments – Partie 9: Chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique.

NBN EN 197-1 (2000)
Ciment – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NBN EN 197-2 (2000)
Ciment – Partie 2: Evaluation de la conformité.

NBN EN 459-1 (2002)
Chaux de construction – Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité.

NBN EN 459-2 (2002)
Chaux de construction – Partie 2: Méthode d'essai.

NBN EN 459-3 (2002)
Chaux de construction – Partie 3: Evaluation de la conformité.

NBN EN 933-1 (1997)
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1: Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage.

NBN EN 933-9 (1998)
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9: Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène.

NBN EN 1097-5 (2008)
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 5: Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée.

NBN EN 13286-2 (2004)
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 2: Méthodes d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et la teneur en eau – Compactage Proctor.

NBN EN 13286-41 (2003)
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 41: Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NBN EN 13286-42 (2003)
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 42: Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NBN EN 13286-47 (2004)
Mélanges non traités et mélanges à la base de liant hydraulique – Partie 47: Méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice portance immédiate (IPI) et du gonflement.

NBN EN 13286-49 (2004)
Mélanges non traités et mélanges à base de liant hydraulique – Partie 49: Essai de gonflement accéléré pour les sols traités à la chaux et/ou liant hydraulique.

NBN EN 1744-1, § 7 (1998)
Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique – Détermination des chlorures solubles dans l'eau avec la méthode de Volhard (méthode de référence).

NBN EN 1744-1, § 11 (1998)
Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique – Détermination de la teneur en soufre total.

NBN EN 1744-1, § 15 (1998)
Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique – Détermination des composés organiques affectant la prise et le durcissement du ciment.

pr EN 13282-1 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement rapide.

pr EN 13282-2 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 2: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement normal.

pr EN 13282-3 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 3: évaluation de la conformité.

Normes belges

NBN B 12-108 (2006)
Ciments – Ciments à haute résistance aux sulfates.

NBN B 12-109 (2006)
Ciments – Ciments à teneur limitée en alcalis.

NBN B 12-110 (2002)
Ciments – Ciments Portland à haute résistance initiale.

NBN 589-207, § 4 (1969)
Essais des sables de construction – Teneur en matières organiques.

Normes françaises

NF P 18-579 (1990)
Granulats – Essai d'abrasivité et de broyabilité.

NF P 94-066 (1992)
Sols: reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-067 (1992)
Sols: reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

Bibliographie

1 **Aquafin**
Model bijzonder bestek voor projecten afdeling engineering leidingen.
Februari 2000

2 **Austroads Inc.**
Guide to stabilisation in roadworks.
Sydney 1998

3 **CIMbéton**
Limons traités à la chaux et/ou au ciment.
Juin 1997

4 **Centre de recherches routières**
Mode opératoire des essais en laboratoire pour l'évaluation de l'aptitude d'un sol à la stabilisation immédiate à chaux vive.
Méthode de mesure CRR-MF 33/72, Bruxelles, 1972

5 **Centre de recherches routières**
Mode opératoire pour la détermination de la stabilité des grumeaux de limons traités à la chaux.
Méthode de mesure CRR-MF 34/73, Bruxelles, 1973

6 **LCPC - SETRA**
Réalisation des remblais et des couches de forme.
Guide technique, fascicules I et II, Paris, septembre 1992

7 **LCPC - SETRA**
Remblayage des tranchées.
Guide technique, Paris, mai 1994

8 **LCPC - SETRA**
Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.
Guide Technique, Paris, janvier 2000

9 *Réemploi d'excédents de déblais de travaux publics en Ile-de-France.*
Guide Utilisation technique. DREIF, Lhoist, Paris, 2001.

10 **Centre de recherches routières**
Stabilisation des sols à la chaux.
Question 16, décembre 1971, La Technique Routière XVI, 4, 1971, pp 33-38, Bruxelles, 1971

11 *Stabilisation des sols à la chaux.*
Contribution au 13e Congrès belge de la Route, Bruges 1973, Association Permanente des Congrès belges de la Route, Section A1, chapitre III, pp. 55-72, 1973

12 *Utilisation des matériaux de Haute-Normandie: les limons.*
Guide technique, novembre 1999

13 **Portland Cement Association**
Soil-Cement Laboratory Handbook.
1971

14 **Devarem - Documentation Technique**
Une plate-forme recyclage.

15 **F. Choquet**
Stabilisation des sols à la chaux: caractéristiques des chaux.
XVe Congrès mondial de la route, Mexico, 11-8 octobre, Contribution au rapport belge, question VIII,VIII/1/8.3.1., Paris, AIPCR, 1975, pp. 2-5

16 **P. Dutron, P. Van Ael**
Stabilisation au ciment de sols contenant des matières organiques.
CRIC 1968

17 **P. Dutron, P. Van Ael**
Stabilisation des limons au ciment.
CRIC 1971

18 **D. Gorle, A. Verhasselt**
Field treatment of soils with lime or hydraulic or pouzzolanic binders.
XIXth World Road Congress, Marrakech, 22-28 September 1991, Technical Committee Report on Earthworks, Drainage, Subgrade, pp. 6-46, PIARC, 1991

19 **L. Hendrikx**
Stabilisatie met cement in de wegenbouw.
VCN, 1980

20 **K. Michielsen**
Manuel de pose des tuyaux en grès.
Keramo Steinzeug, Hasselt, 3ème édition, 2004

21 **Marc Schaeffner**
Equipment and methods specific to soil treatment works / Matériels et techniques d'exécution spécifiques aux travaux de traitement des sols.
PIARC/AIPCR, Technical Committee on Earthworks, Drainage, Subgrade (C12), 1997

22 **P. Sion**
Met cement stabiliseerbare gronden in België.
De Wegentechniek XII/1, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, 1967, blz. 49-64

23 **P. Van Ael,**
De cementstabilisatie van diverse Belgische grondsoorten.
OCCN, 1974

24 **Bram van Egmond, Kurt Hermann,**
Stabilisation à la chaux.
TFB (industrie suisse du ciment), Bulletin du Ciment, n° 4 - avril 1997

25 **R. Van Ganse**
L'assèchement des limons par la chaux.
Extrait du Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC n° 53 (juin-juillet 1971)

26 **R. Van Ganse**
Quelques aspects théoriques et pratiques de la stabilisation des sols à la chaux (Effets immédiats de la chaux).
La Technique Routière XVI, 3, 1971, pp. 1-36
A également paru dans la revue «Excavator» décembre 1972, pp. 25-60

27 **R. Van Ganse, A. Brull, F. Choquet, D. Gorle, P. Thienpont, A. Verhasselt (e.a.)**
Terrassements, drainage et stabilisation des sols.
XIIIe Congrès belge de la route, Bruges, 15-8 mai 1973, Section AI, v.1, APCBR, 1973, pp. 1-95

28 **M. Venuat**
Le traitement des sols à la chaux et au ciment.
1980

29 **A. Verhasselt**
La stabilité des grumeaux de sols traités à la chaux.
La Technique Routière XVIII, 1, 1973, pp. 25-36, Centre de recherches routières, Bruxelles, 1973

30 **A. Verhasselt**
Le traitement des sols à la chaux - point de la question.
Conférence présentée à «Intermat 1973» le 13 septembre 1973, La Technique Routière XX, 1, 1975, pp 1-26,
Centre de recherches routières, Bruxelles, 1973

31 **A. Verhasselt**
Amélioration immédiate à la chaux.
Rapport de recherche n°176/VA/1978, Centre de Recherches routières, Bruxelles, 1978

32 **A. Verhasselt**
Stabilisation à la chaux.
Rapport de recherche n°177/VA/1978, Centre de Recherches routières, Bruxelles, 1978

33 **A. Verhasselt**
Mélange chaux-gypse pour le traitement des sols: journée d'étude nouvelles orientations de la technique structurelle de la route.
ARPCBR, pp. 31/4, Anvers, 26 septembre 1990

34 **J.-M. Baryla, V. Chenais, L. Gavois, H. Havard**
Effet des sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier.
Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées - 224 - janvier - février 2000, pp. 39-48

35 *La chaux dans le traitement des sols*
Fiches techniques, Chambre syndicale nationale des fabricants de chaux grasses et magnésiennes

36 **A. Verhasselt**
Amélioration des sols à la chaux.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

37 **A. Le Roux et al**
Mise en évidence de l'aptitude au traitement des sols argileux.
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 154, mars-avril 1988, réf. 3279

38 **W. Grossmann**
La stabilisation à la chaux des sols cohérents.
traduit de l'allemand par M. Schaeffner, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris 1968

39 **L. Rens**
Machines en uitrusting voor stabilisatie en recyclage in situ.
Provinciale contactdag - FEBELCEM - OCW, januari 2002-02-04

40 **H. Van den Bergh**
Etude préliminaire.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

41 **P. Keppens**
Utilisation de mélanges chaux-ciment.
Journée d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de Recherches routières, Bruxelles, mai 2001

42 **E. Van den Kerkhof**
Techniques de malaxage.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

43 **F. Verhelst**
Aspects environnementaux des traitements de sols.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

44 **B. Dethy**
Les spécifications propres au traitement à la chaux des sols en vue de leur réutilisation au droit des remblais de plateforme du TGV
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

45 **S. Godefroid**
La fabrication de la chaux et sa logistique en chantiers routiers.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

46 **J.-M. Mousny**
Applications concrètes.
Matinées d'étude «Le traitement des sols à la chaux», Centre de recherches routières, Bruxelles, mai 2001

47 *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées.*
Guide technique Sétra, 2007

48 **F. Hénin, J. Vecoven**
Liant hydraulique pour amélioration de sols
Paris, France, Tremti 2005, C071

49 **P. Keppens**
Experimental Jobsite of the Use of Stabilised Plastic Soil
in Capping Layers, Paris, France, Tremti 2005, C157

50 **H. Egner, H. Riehm, W.R. Domingo**
Investigation of chemical soil analyses which are used as a basis for determination of soil fertility – II. Chemical extraction methods for determination of phosphorus and potassium concentrations.
Kunglica Landbrukshögskolans Annaler, 1960, 26: 199-215 (In German).

51 **E. Lakanen, R.A. Erviö**
Comparison of eight extractants for determination of plant available micronutrients in soil.
In: Acta Agr. Fennenica, 1971, 123: 223-232.

Recommandation – R81/10 – 2010

Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques / Centre de recherches routières

- Bruxelles : CRR, 2010.

- 96 p.

- (recommandation ; 81).

Le traitement des sols est une technique qui offre des solutions économiques et écologiques à la problématique des terres de déblais, tant pour les petits que pour les grands chantiers. Ce document est une révision du Code de bonne pratique pour le traitement du sol à la chaux et/ou au ciment (R74/04) publié en 2004. Une mise à jour s'imposait pour y introduire les liants hydrauliques routiers utilisés comme agents de traitement, certains aspects relatifs aux études de laboratoire et le remplacement des normes nationales par les normes européennes. Ce code révisé est constitué de trois chapitres. Le premier traite de la connaissance du sol. Elle est primordiale, car elle permet d'évaluer la pertinence du traitement, de déterminer le type de traitement et d'avoir une première estimation de la quantité d'agent de traitement à utiliser. Ce chapitre fait donc le point sur le comportement des différents types de sols et sur les caractéristiques permettant de les différencier et donne un aperçu des essais de laboratoire à réaliser. Le deuxième chapitre donne une description des différents agents de traitement et de leurs effets sur le sol (processus entrant en jeu dans les traitements d'amélioration et de stabilisation des sols). Le troisième chapitre décrit la conduite du chantier et donne un aperçu du matériel disponible pour le traitement des sols. Enfin, une annexe reprend, de façon succincte, les concepts de base de la mécanique des sols qui sont nécessaires à une bonne compréhension des processus de traitement des sols décrits dans cet ouvrage.
Ce document théorique général est complété par quatre guides pratiques rédigés pour les différentes applications du traitement des sols :
« Amélioration des sols pour le remblayage des tranchées d'égouts et l'enrobage des tuyaux »; « Stabilisation des sols pour les couches de sous-fondation »; « Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre » et « Plates-formes industrielles – Fondations par traitement de sol ». Les trois premiers publiés pour la première fois en 2004 ont également été révisés et le quatrième a paru au début 2010.

Classification ITRD

42 – Mécanique des sols ; 41 – Reconnaissance générale des sols ; 51 – Terrassement et drainage des sols

Mots-clés ITRD

3689 – TRAITEMENT DES SOLS ; 4574 – CHAUX ; 4758 – CIMENT ; 4948 – LIANT ; 4748 – HYDRAULICITE ; 4156 – SOL ; 2455 – ENVIRONNEMENT ; 0177 – RECOMMANDATION ; 9001 – COMPORTEMENT ; 5925 – CARACTERISTIQUES ; 6255 – ESSAI ; 8008 – BELGIQUE ; 3649 – MALAXAGE ; 3686 – COMPACTAGE

Terme additionnel

LIANT HYDRAULIQUE

Commande

Réf.: R81/10 Prix: 26,50 € (excl. 6 % TVA) Fax: +32 2 766 17 87
(y compris les quatre Guides pratiques)

publication@brrc.be

Dépôt légal: D/2009/0690/13
ISSN 1376 - 9340



Centre de recherches routières

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

boulevard de la Woluwe 42

1200 Bruxelles

Tél. : 02 775 82 20 - fax : 02 772 33 74

www.crr.be

3

Centre de recherches routières

Guide pratique

Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre



Complément au Code de bonne pratique R 81/10

Table des matières

Remarque préliminaire

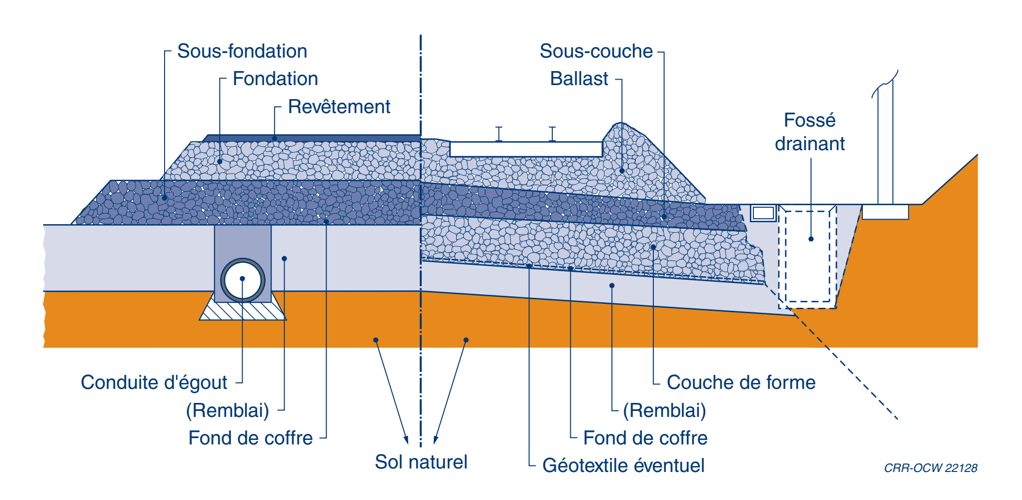
Ce document est un guide pratique. Il suggère les principes et la manière pratique d'aborder le problème du traitement des sols. Il ne se substitue pas aux normes en vigueur ni aux cahiers des charges-types.

1 Introduction

Lors de l'exécution d'opérations de terrassement et la réalisation de fonds de coffre, la réutilisation en l'état des sols fins, sensibles à l'eau et/ou souvent trop humides, s'avère en général difficile. Pour leur réemploi, le traitement de ces sols avec un liant est indispensable. Cette technique est en général une alternative plus économique que l'apport de matériaux nobles.
L'ajout de l'agent de traitement permet d'obtenir une meilleure traficabilité et améliore l'aptitude du sol au compactage, assurant ainsi une mise en oeuvre correcte. En outre, le liant confère au sol une portance directe, maintenue ou croissant dans le temps.

Le choix de l'agent de traitement et de son dosage est déterminé par le type de sol, sa teneur en eau au moment du traitement ainsi que par les caractéristiques visées.

Nous nous limiterons aux agents de traitement bien connus: la chaux, le ciment et les liants hydrauliques routiers (LHR).



Ce guide pratique présente une approche opérationnelle du traitement des sols. Il est constitué d'organigrammes permettant de prendre une décision rapide quant à la pertinence d'une amélioration du sol.

Il constitue un complément au document théorique général R81/10 *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* qui reprend des informations additionnelles indispensables à la compréhension du présent fascicule:

- description des différents types de sol et de leurs caractéristiques ainsi qu'un aperçu des essais de laboratoire à réaliser pour évaluer la pertinence d'un traitement et les dosages à appliquer;
- description des différents agents de traitement et de leurs effets sur le sol;



- description de la conduite du chantier ainsi qu'un aperçu du matériel disponible pour traiter les sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.



Le présent guide n'a pas la vocation de se prononcer quant à la qualité environnementale du sol à recycler et part du postulat que les terres que l'on envisage d'améliorer répondent aux exigences des législations environnementales en vigueur pour l'application visée et à l'endroit considéré.

Les différentes étapes à envisager en vue du traitement d'un sol pour son utilisation en terrassements et en fond de coffre sont:

avant l'exécution des travaux:

- Prélèvements d'échantillons représentatifs.
- Détermination de l'homogénéité/hétérogénéité des matériaux.
- Analyse des échantillons (rassemblés en groupes homogènes):
  - granulométrie «simplifiée»:
    - D_{max} (dimension du plus gros élément)
    - passant à 2 mm
    - passant à 63 µm
  - teneur en eau naturelle du sol
  - valeur de bleu de méthylène (MB) (mesure indirecte de l'argilosité du sol)
  - teneur en matières organiques (MO), sulfates, etc.

  → Classification des matériaux et détermination de l'aptitude au traitement
- Etude de formulation: détermination du dosage optimal en agent de traitement en fonction des caractéristiques visées

au moment de l'exécution des travaux:

- Exécution: épandage – malaxage – compactage – stockage

après exécution des travaux:

- contrôles:
  - contrôle de l'exécution
  - contrôle du produit utilisé
  - contrôle du compactage
  - contrôle de portance

Les organigrammes qui suivent respectent les conventions suivantes:

- [cadre orange] opérations réalisées par un laboratoire accepté par le maître d'ouvrage
- [cadre bleu] détermination de l'aptitude du sol à être amélioré



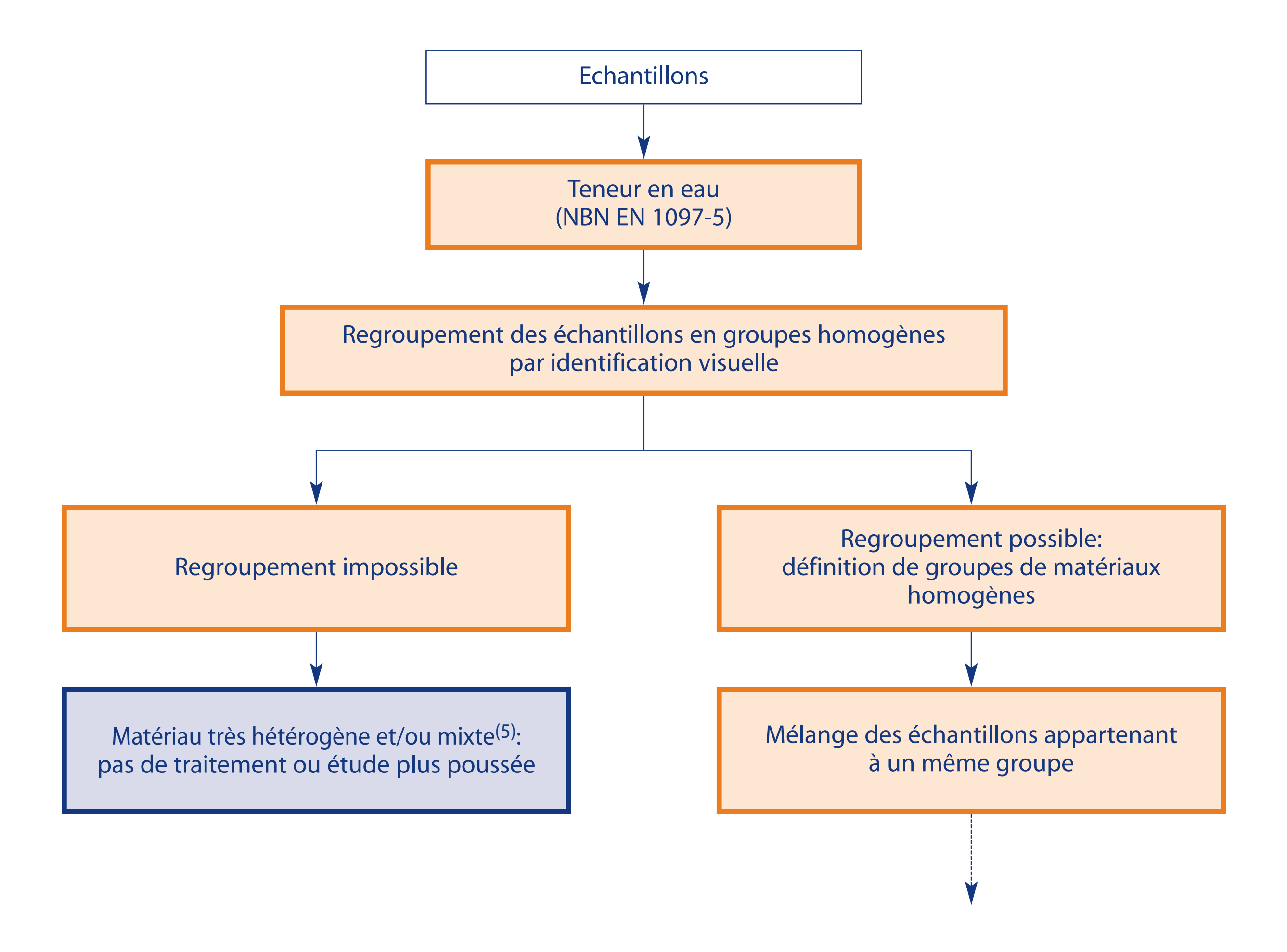
2 Prélèvements d'échantillons représentatifs

Projet de terrassement

Pas de déplacement de terre[1]	Déplacement de terre[2]
Amélioration du fond de coffre	Amélioration du sol
Consultation des cartes pédologiques et/ou géotechniques	Consultation des cartes pédologiques et/ou géotechniques
	Identification des zones à déblayer/remblayer Rédaction d'un plan de mouvement de terre
Au moins 1 sondage à la tarière (manuel/motorisé) tous les 3 000 m^2 [3]	Au moins 1 sondage à la tarière (manuel/motorisé) tous les 2 500 m^3 [3]
Prélèvement d'échantillons dans les couches à traiter (25 kg de matériau/échantillon)[4]	**Prélèvement d'échantillons dans les couches à traiter (25 kg de matériau/échantillon)[4]**

1 Le fond de coffre est réalisé sans apport de remblai.
2 L'établissement de la voirie nécessite des travaux de déblai et de remblai.
3 La fréquence sera adaptée en fonction du projet, des conditions locales, des impositions du maître d'ouvrage. Celle-ci peut être augmentée dans le cas de sols fortement hétérogènes.
4 Il faut veiller à prélever suffisamment d'échantillons pour pouvoir effectuer les différents essais de laboratoire détaillés ci-après (essais d'identification + essais de formulation). Pour chaque type de sol, un minimum de 200 kg est nécessaire.
Remarque: Pour une étude simplifiée, la quantité de matériaux à prélever est à évaluer avec le laboratoire qui réalisera l'étude.

3 Détermination de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux



5 Un matériau mixte correspond à un mélange d'un type de matériau avec un autre type (ex: argile mélangée à du gravier ou du remblai) ou un matériau contenant des éléments de nature différente. Ce type de matériau mélangé n'est donc pas réutilisable comme un matériau homogène.



4 Analyse des échantillons

Mélanges d'échantillons appartenant à un même groupe

↓

Classification des matériaux et détermination de leur aptitude à être traités sur base de l'analyse des paramètres suivants:

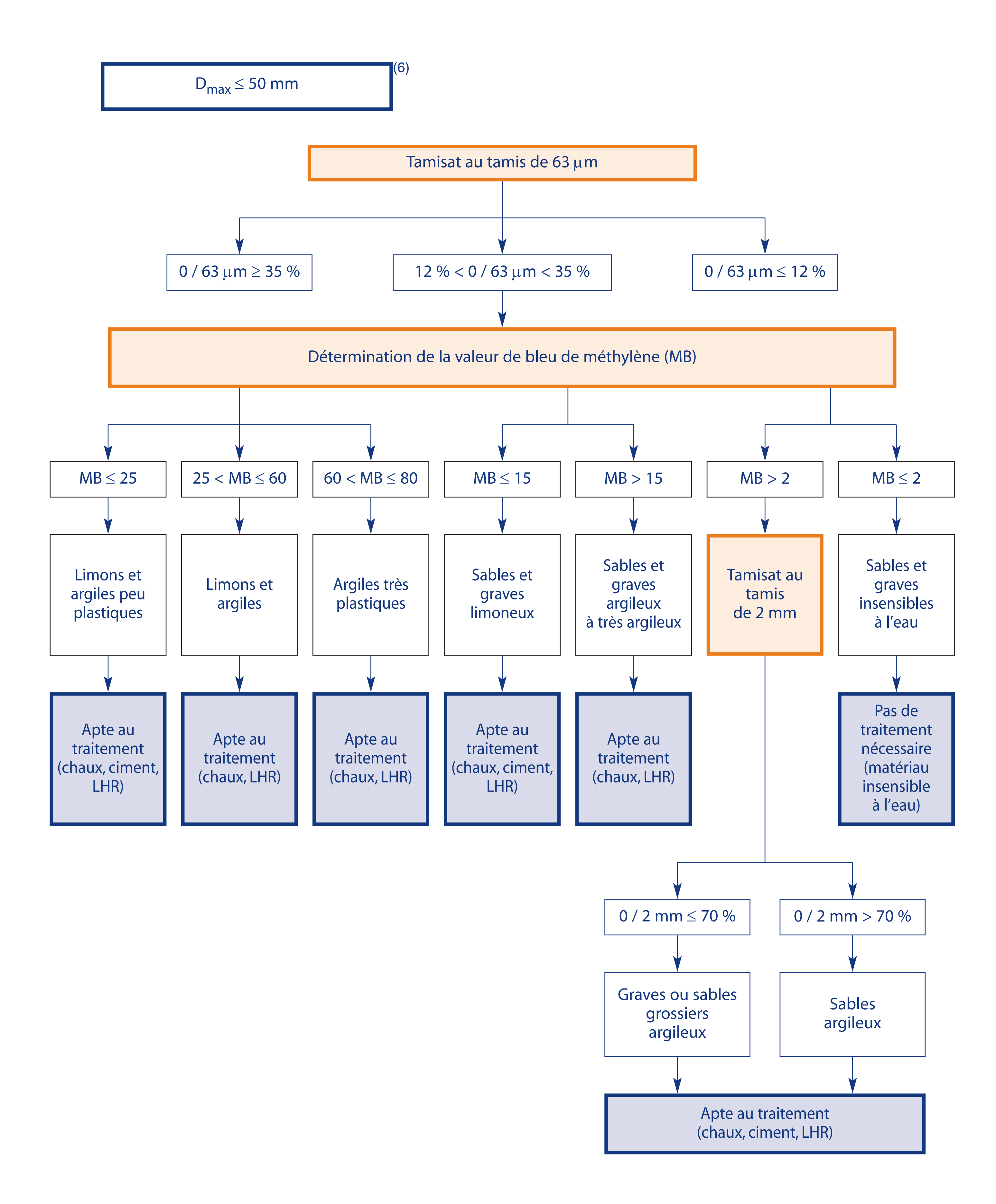
- granulométrie simplifiée (D_{max}, passant à 2mm, passant à 63 mm)
- valeur de bleu de méthylène (MB)
- teneur en eau naturelle
- matières organiques (MO) (NBN 589-207, §4 et NBN EN 1744-1, §15)

↓

Détermination de la teneur en matières organiques de la fraction 0/2

↓

- Teneur en MO > 3 %
  - ↓ Pas de traitement ou étude plus poussée
- Teneur en MO ≤ 3 %
  - ↓ En cas de doute: sol pollué ou sol naturel spécifique (autres paramètres chimiques: sulfates, nitrates, phosphates, etc.)
    - Sol non pollué
      - ↓ Détermination du D_{max}
        - $D_{max} \leq 50$ mm
        - $D_{max} > 50$ mm
    - Sol pollué
      - ↓ Pas de traitement ou étude plus poussée



6 Schéma basé sur les recommandations du *Guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule II annexes techniques*, LCPC - SETRA, septembre 1992.



D_{max} > 50 mm

Tamisat au tamis de 2 mm

- 10 % < 0 / 2 mm ≤ 40 %
- 40 % < 0 / 2 mm ≤ 80 %
- 0 / 2 mm > 80 %

Détermination de la valeur de bleu de méthylène (MB)

MB > 15	MB ≤ 15	MB > 15	MB ≤ 15	MB > 15	MB ≤ 15
Matériau pierreux à horizon argileux	Matériau pierreux à horizon sablo-limoneux	Sol fin argileux à charge pierreuse	Sol fin limoneux à charge pierreuse	Sol fin argileux à faible charge pierreuse	Sol fin sableux, limoneux ou peu argileux à faible charge pierreuse
Apte au traitement (chaux, ciment, LHR)	Pas de traitement (matériau peu sensible à l'eau)	Apte au traitement (chaux, LHR)	Apte au traitement (chaux, ciment, LHR)	Apte au traitement (chaux, LHR)	Apte au traitement (chaux, ciment, LHR)

0 / 2 mm ≤ 10 %
Matériau pierreux contenant peu de fines

Pas de traitement (matériau insensible à l'eau)

5 Etude de formulation

5.1 Généralités

L'étude de formulation consiste à étudier les performances du sol traité pour différents dosages en agent de traitement, dans la plage de teneurs en eau prévisibles sur chantier.
Les résultats des études de formulation se traduisent par des abaques donnant, en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution, les dosages en agent de traitement à appliquer à un sol pour atteindre les caractéristiques recherchées (portance, compacité, etc.).

Détermination des graphiques

Une étude est composée de plusieurs étapes:

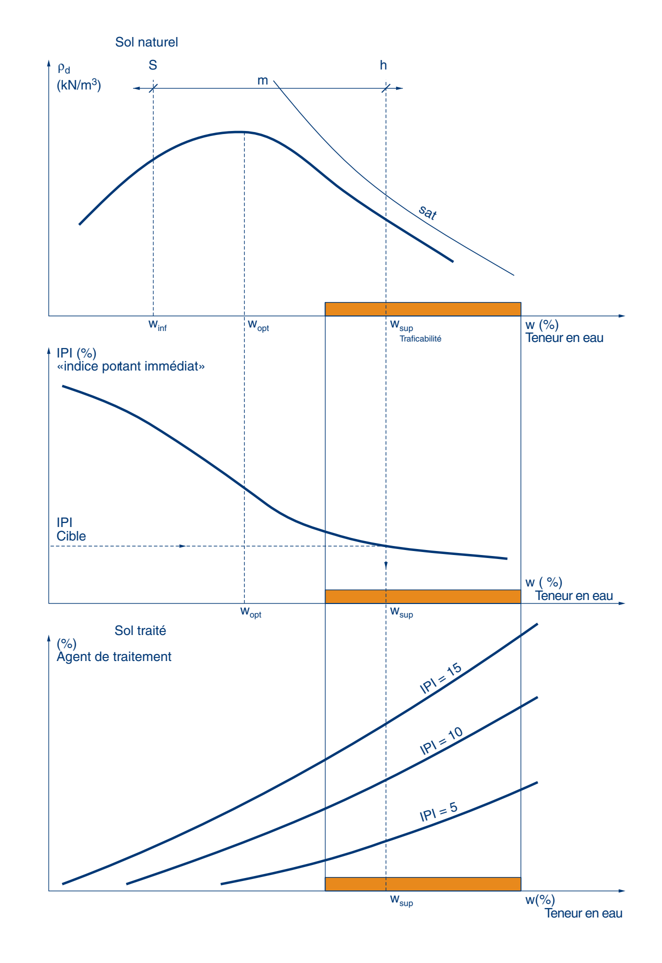
1. Sur des matériaux non traités, détermination de:

   - la courbe Proctor normal (minimum cinq points);
   - l'indice de portance IPI sur les éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbe Proctor.

2. Pour 3 dosages différents en agent de traitement (en général 1, 2 et 3 % du poids sec du mélange), quatre teneurs en eau sont choisies dans la plage attendue lors du chantier.

   Deux heures après malaxage (chaux ou LHR), avec conservation sous emballage fermé hermétiquement, des échantillons sont compactés à l'énergie Proctor normal.

   Directement après malaxage (ciment), compactage des éprouvettes à l'énergie Proctor normal.



3. L'indice IPI est mesuré immédiatement après compactage sur chacune des éprouvettes.

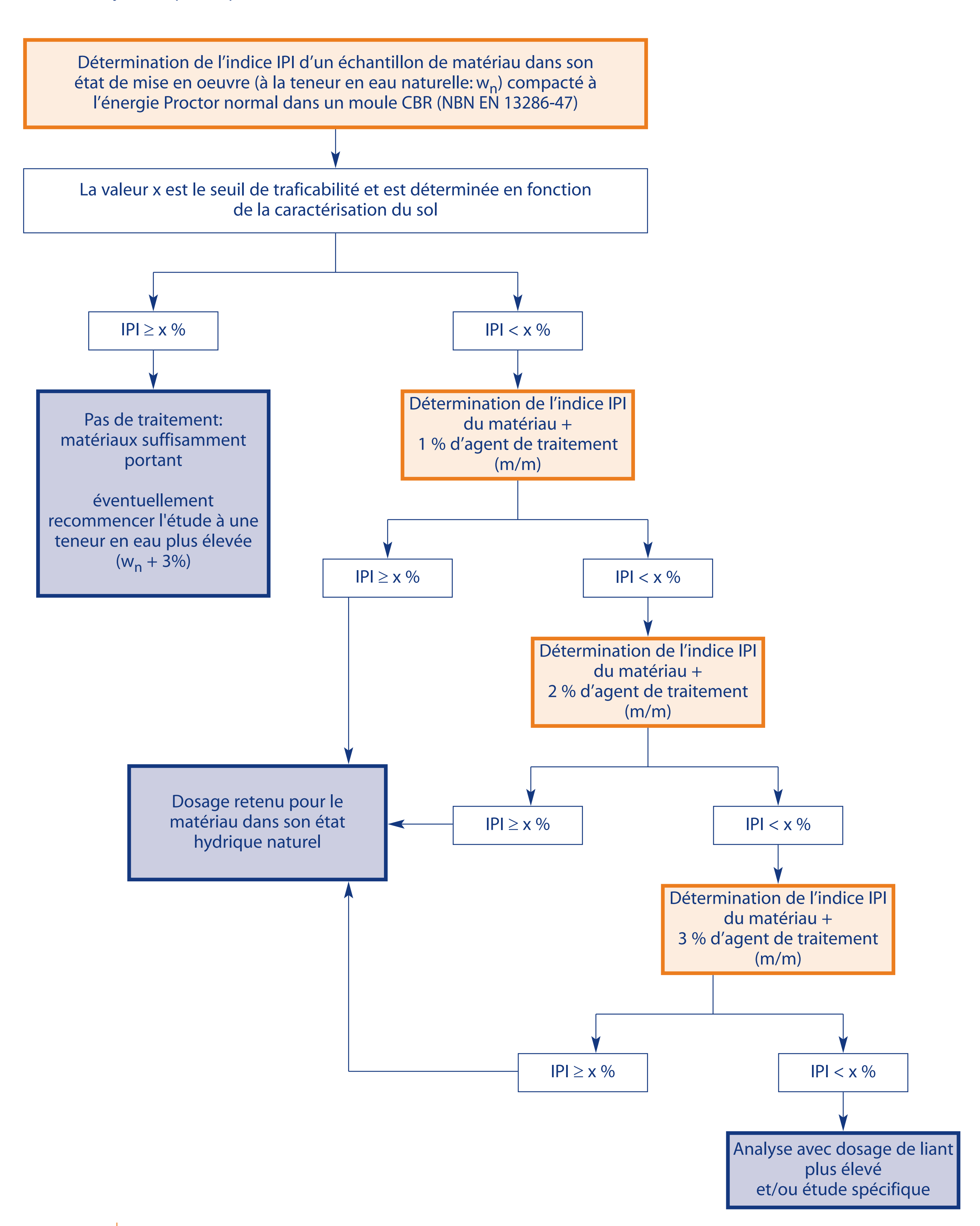


4. Le facteur $CBR_{4j\ d'immersion}$ / IPI à la teneur en eau attendue sur chantier w_n est déterminé pour chaque dosage en liant.

On peut ainsi tracer une courbe de variation de l'indice IPI en fonction de la teneur en eau au compactage pour chaque dosage en agent de traitement.
Au moment des travaux, en cas de conditions climatiques favorables (vent, temps sec et ensoleillement), une augmentation du délai entre le malaxage et le compactage permet une augmentation de la performance du compactage par une diminution complémentaire de la teneur en eau (traitement à la chaux ou LHR si le délai de maniabilité du LHR le permet).

En pratique, pour les sols traités à la chaux ou au LHR en centrale, ce délai de 2 h entre le malaxage et le compactage peut être plus long. L'étude en laboratoire peut en tenir compte et adapter le délai entre le malaxage et compactage.

5.2 Analyse simplifiée pour chantier de taille inférieure à 2 500 m³





5.3 Nécessité du traitement en fonction de la portance

5.3.1 Portance immédiate des remblais ou fonds de coffre

On utilise la valeur IPI(7). L'objectif de l'indice de portance est indiqué dans le tableau 1 ci-dessous(8).

5.3.2 Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances de l'IPI, le facteur $CBR_{4j\ d'immersion}$ / IPI doit être supérieur ou égal à 1.

Tableau 1 – *Objectifs du traitement des sols pour la réutilisation des sols trop humides en remblai ou fond de coffre*

Catégorie de sol	Valeur d'IPI à atteindre (remblais)	Valeur d'IPI à atteindre (fond de coffre)
Limons et argiles peu plastiques (MB ≤ 25)	10	12
Limons et argiles (25 < MB ≤ 60)	7	10
Argiles très plastiques (MB > 60)	5	8
Sables	15	15
Graves	20	20

7 Les valeurs obtenues en laboratoire peuvent être différentes des valeurs obtenues durant l'exécution car elles ne tiennent pas compte des effets climatiques qui peuvent être positifs pour la réduction de l'humidité en cas de temps sec ou négatifs en cas de temps pluvieux.

8 Tableau basé sur les recommandations du *Guide technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, LCPC-SETRA*, janvier 2000.

6 Exécution

Le traitement du sol est réalisé in situ (traitement du sol en place sans déplacement de celui-ci) ou en centrale de traitement (mobile ou fixe).

Les différents agents de traitement[9] sont:

- la chaux de classe CL90Q selon la norme NBN EN 459 correspondant aux exigences de la PTV 459,
- le ciment selon la norme NBN EN 197-1,
- les LHR selon les normes en projet prEN 13282-1, prEN 13282-2 et prEN 13282-3.

Le dosage est calculé sur base de la masse sèche du mélange (1 % = 10 kg d'agent de traitement pour 1 tonne de mélange sec).

6.1 Traitement

6.1.1 Traitement in situ

6.1.1.a Epandage de l'agent de traitement

L'épandage de l'agent de traitement se fait à l'aide d'un épandeur apte à respecter le dosage envisagé. L'épandage doit se faire sur toute la surface à traiter par bandes parallèles adjacentes, bords à bords ou, mieux, avec un recouvrement de quelques centimètres pour garantir une répartition uniforme.

Pour des petits chantiers, l'épandage peut éventuellement se faire manuellement (agent de traitement en «big bags» ou en sacs).

Le dosage ne peut différer de ± 10 % de la valeur du dosage prescrit.

L'opération doit être menée de façon à réduire au maximum la production de poussière.

En cas de précipitations, l'épandage est arrêté.

6.1.1.b Malaxage

Le malaxage en couche étalée permet un rendement plus élevé dans des conditions de chantier adaptées, c.-à-d. des grandes surfaces sans obstacles (tuyaux, chambres de visite,etc.). Dans le cas d'un traitement en couche étalée, la couche de sol est malaxée d'une façon intensive après l'épandage, jusqu'à obtention d'un mélange homogène sur toute la surface et dans toute l'épaisseur de la couche

9 Une description des différents agents de traitement est fournie dans le document théorique R81/10 *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.*

traitée (couleur et structure uniformes). Seuls des malaxeurs à outils animés peuvent obtenir une homogénéité suffisante.

Le malaxage s'effectue immédiatement (endéans le 1/4 h) après l'épandage pour éviter la dispersion de l'agent de traitement par le vent (ainsi qu'une perte de réactivité dans le cas de la chaux).

Il faut veiller à ce que l'humidité du sol avant traitement corresponde à l'optimum déterminé par l'étude en laboratoire. Si nécessaire, il faut ajuster la teneur en eau. Un apport d'eau éventuel, après scarification de la surface adaptée à l'argilosité du sol, se fait la veille du traitement afin de permettre au sol d'absorber l'eau (pour des sols très argileux, un délai plus important peut être nécessaire).

Le malaxage s'exécute par bandes longitudinales successives. Chaque bande recouvre la précédente sur une largeur minimale de 10 cm. Aussi les bandes longitudinales se recoupent suffisamment pour que les lieux d'arrêt du pulvimixeur ne soient pas des points faibles dans la structure.

L'opération est menée de façon à limiter la production de poussière.

En cas de précipitation soudaine, le malaxage est interrompu et un premier compactage est effectué. A la reprise des travaux et dans le cas d'un traitement à la chaux ou au LHR, le malaxage est achevé avec, si cela s'avère nécessaire par l'augmentation de la teneur en eau, un épandage complémentaire de liant.

Dans le cas d'un traitement au ciment, le malaxage est achevé le plus vite possible et suivi par un compactage final.

6.1.2 Traitement en installation fixe ou mobile

6.1.2.a Dosage

L'installation doit permettre l'alimentation en agent de traitement de manière à respecter le dosage envisagé. Le dosage ne peut différer de ± 10 % de la valeur prescrite.

6.1.2.b Malaxage

D'une manière générale, le traitement en installation annexe présente les avantages suivants:

- meilleure homogénéité du mélange;
- réduction des émissions de poussière.

Le mélange doit être homogène à la sortie de l'installation: aspect de couleur et de structure uniforme.

6.1.2.c Stockage

En cas d'utilisation de ciment, le stockage n'est pas autorisé.

6.1.2.d Chargement

La qualité du produit ne peut être endommagée lors du chargement. Il ne peut y avoir de formation de bloc.

Pour plus de détails concernant ce paragraphe, on peut se référer au TRA 16 de COPRO *Sols traités sur site fixe*.

6.2 Compactage

Le compactage de sol traité demande une attention toute particulière. La couche est compactée à la densité exigée. Le nombre de passes dépend du type de sol, de l'épaisseur de la couche et du type de compacteur.

Afin d'obtenir le degré de compactage et la portance exigés, il est avisé de limiter l'épaisseur de la couche à **30 cm**. Une épaisseur supérieure peut être appliquée si l'entreprise prouve que les moyens de compactage permettent une épaisseur supérieure (limitée à 45 cm).

Des valeurs pour l'épaisseur de la couche traitée et pour le délai de compactage peuvent également être fixées dans les cahiers des charges (cahier des charges spécial, CCT RW99, CCT2010 ou SB250).

Le réglage définitif des couches stabilisées se fait par rabotage sur toute la surface et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Ce réglage suit immédiatement le compactage.

En cas d'utilisation de chaux, il est conseillé, par temps sec, de laisser le mélange exposé à l'air (généralement 1 à 3 h) pour favoriser l'évaporation de l'eau. La durée d'aération dépend aussi de l'organisation du chantier.

Dans le cas de l'utilisation de ciment, le compactage se termine dans les 2 heures après le début de malaxage.



En cas d'utilisation de LHR, un délai entre le malaxage et le compactage peut être bénéfique pour profiter d'un temps sec d'aération. Le délai de maniabilité est à vérifier auprès du producteur.

En fin de journée, il est conseillé de fermer la surface en compactant au rouleau lisse ou au rouleau à pneus. Il faut prendre des mesures pour évacuer les eaux de pluie.

6.3 Traficabilité et protection contre les sollicitations de trafic

Le délai à respecter pour circuler sur la couche traitée sera déterminé par les résultats des essais de laboratoire (voir 5. *Etude de formulation*).

Une attention particulière est demandée pour l'utilisation d'engins de manutention sur chenilles. Les chemins de déplacement (et surtout les zones de giration) de ces engins doivent être protégés par une couche granulaire d'une épaisseur suffisante ou par l'installation de plateaux en bois ou métalliques temporaires, de manière à éviter l'endommagement de la couche de sol traité dont l'épaisseur minimale doit être garantie.

6.4 Conditions climatiques

6.4.1 Traitement à la chaux

En cas de vent fort, de pluie persistante ou lorsque la température du sol à traiter est inférieure à 4° C, le traitement de sol est interrompu.

En cas de gel, les couches éventuellement décompactées lors du dégel sont recompactées au degré imposé; les matériaux éventuellement détrempés sont retraités.

6.4.2 Traitement aux LHR

Il est recommandé de ne pas traiter si la température est inférieure à 5 °C.

6.4.3 Traitement au ciment

La mise en œuvre est interdite lorsque la température de l'air mesurée sous abri, à 1,5 m du sol, est inférieure ou égale à 1 °C à 8 heures du matin ou inférieure ou égale à -3 °C durant la nuit.

6.5 Stockage du sol traité

Un mélange sol-chaux peut éventuellement être stocké pendant une période maximale d'environ 3 mois, pour autant qu'il soit protégé des précipitations.

Dans le cas d'une amélioration au LHR pour laquelle les dosages restent limités, les recommandations émises pour le sol traité à la chaux restent d'application. Il est néanmoins conseillé de vérifier auprès du producteur si le LHR utilisé permet le stockage du sol traité avec conservation des caractéristiques acquises par le traitement.

Pour la zone de stockage du sol traité, il convient d'assurer un bon écoulement des eaux superficielles afin d'éviter la stagnation de l'eau au pied des sols stockés.

Au moment de la réutilisation, il convient de remesurer la teneur en eau et d'éventuellement ajuster celle-ci par un traitement complémentaire pour obtenir la teneur en eau optimale déterminée en phase de projet.



7 Contrôles

Les tests qui permettent de contrôler les caractéristiques recherchées sont les suivants.

7.1 Contrôle du produit utilisé (agent de traitement ou sol traité en centrale)

Au moment de la livraison

Vérification des bons de livraisons, des marques de certification (COPRO, BENOR, marquage CE) et de la conformité des agents de traitement aux exigences du cahier spécial des charges et à l'étude de laboratoire. Si l'agent de traitement n'est pas conforme, procéder à la vérification des paramètres (voir cahiers des charges et normes en vigueur).

Après stockage

Pour la chaux: vérification de la réactivité T60 et la teneur en CaO disponible (voir cahiers des charges).

7.2 Contrôle de l'exécution

Le contrôle de l'*épandage* se fait ponctuellement par le pesage d'une bâche de 0,5 m^2 ou d'une platine de surface connue et, en global, par le contrôle quotidien du poids total épandu sur une surface donnée.

Le contrôle de l'*humidité* du sol traité avant compactage se fait par la détermination de la teneur en eau d'un échantillon retiré de la couche non compactée.

L'*épaisseur de la couche* après compactage est vérifiée par des sondages dans la couche traitée.
En cas de doute, une solution de phénolphtaléine peut indiquer la transition entre sol traité et non traité.

Le cas échéant:

Contrôles du malaxage: divers essais de contrôle permettent de vérifier la bonne réalisation du malaxage (profondeur de malaxage, homogénéité du mélange). Nous renvoyons le lecteur au document théorique R81/10 *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* pour la description de ces essais.

Contrôle de portance: un échantillon de sol traité est compacté à l'énergie Proctor normal et la valeur IPI est vérifiée. A faire à chaque changement de dosage.

7.3 Contrôle du compactage

Essai à la plaque dans les délais prescrits dans les cahiers des charges (en surface de chaque couche compactée):

- Corps du remblai: le module de compressibilité M1 doit être ≥ 11 MPa.
- Dernier mètre du terrassement et niveau du fond de coffre: le module de compressibilité M1 doit être ≥ 17 MPa.

Sonde de battage dynamique:

- Sonde de battage légère de type CRR: enfoncement < 40 mm/coup.
- Panda:
  - Degré de densification > 95 % de l'OPN en corps de remblai.
  - Degré de densification > 98 % de l'OPN dans le dernier mètre du terrassement.



8 Normes

NBN EN 1097-5 (2008)
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats –
Partie 5: Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée.

NBN 589-207 §4 (1969)
Essais des sables de construction – Teneur en matières organiques.

NBN EN 1744-1 §15 (1998)
Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats –
Partie 1: Analyse chimique – Détermination des composés organiques affectant la prise et le durcissement du ciment.

NBN EN 933-9 (1998)
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats –
Partie 9: Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène.

NBN EN 13286-2 (2004)
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques –
Partie 2: Méthodes d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et la teneur en eau – Compactage Proctor.

NBN EN 13286-47 (2004)
Mélanges non traités et mélanges à la base de liant hydraulique –
Partie 47: Méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice portance immédiate (IPI) et du gonflement.

NBN EN 459-1 (2002)
Chaux de construction – Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité.

NBN EN 459-2 (2002)
Chaux de construction – Partie 2: Méthode d'essai.

NBN EN 197-1 (2000)
Ciment – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

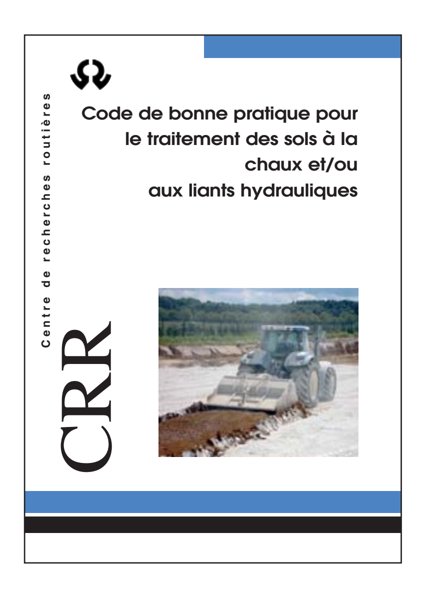
pr EN 13282-1 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement rapide.

pr EN 13282-2 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 2: Composition, spécifications et critères de conformité des liants hydrauliques routiers à durcissement normal.

pr EN 13282-3 (2009)
Liants hydrauliques routiers – Partie 3: Evaluation de la conformité.

Dépôt légal: D/2009/0690/13

ISSN 1376-9340



Centre de Recherches routières

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

boulevard de la Woluwe 42

1200 Bruxelles

Tel. : 02 775 82 20 - fax : 02 772 33 74